Fehlt

Physik

des täglichen Lebens.

Rationelle Naturlehre
für Gebildete überhaupt und für vorgeschrittene Schüler an
Gymnasien, Realschulen und Schullehrerseminarien.

Von

H. Fahle
Professor, Oberlehrer am
Gymnasium in Posen.

und

H. Lampe
Dr. ph., Lehrer am Gymnasium
in Danzig.

Leipzig
Verlag von Quandt & Händel.
1874.

Vorwort und Einleitung.

Die vorliegende „Rationelle Physik des täglichen Lebens“ ist nicht ein Lehrbuch, das für den ersten Unterricht bestimmt ist oder etwa in dieser oder jener Schulanstalt als Leitfaden dienen soll, das Buch will vielmehr die schon in den Elementen der Wissenschaft Unterrichteten, den durch Anschauung des gewöhnlichen Schulexperiments Herangebildeten eine Anregung werden, das Gelernte, Geschaute und bruchstückweise Aneinandergereihte innerlich in eine einheitliche Anschauung zu verarbeiten, um von diesem Standpunkte physikalischer Erkenntniß aus auch die übrigen Zweige seines Wissens zu beleben und zu befruchten.

Innerhalb der Naturwissenschafften hat die Physik allmälig eine große Bedeutung gewonnen. Früher eine Sammlung von sehr verschiedenartigen Erfahrungssätzen und Beobachtungen, eine wahrhaft „bunte Halle“ von Kenntnissen und Lehrsätzen ist sie gegenwärtig nicht ein Inbegriff von Kenntnissen über Eigenschaften und Erscheinungen des Körperlichen oder allgemeiner des Materiellen, als vielmehr der Regulator dieser Kenntnisse, sie ist *Philosophie der Natur* im Sinne des gemeinen Menschenverstandes, aber nicht *Naturphilosophie*, welche Ursprung und Wesen des Seins feststellen will; sie ist ähnlich der Mathematik eine von der Erfahrung ausgehende abstracte Wissenschaft, sie ist Bewegungslehre wie die Mathematik Größenlehre. *Physik und Mechanik sind identisch.* Mit demselben Rechte, mit welchem die Mathematik allen naturwissenschaftlichen Disci-

plinen zu Grunde gelegt werden will, mit eben demselben Rechte wird diese Forderung für die Physik gestellt werden müssen. Während die Mathematik bloß die räumliche Anschauung zu Grunde legt, der Bewegung als solcher aber zur genetischen Herleitung ihrer Grundbegriffe nicht entrathen kann, fügt die Physik der Bewegung im Raum den Zeitbegriff hinzu, und dreht sich wesentlich um das Verhältniß von Raum und Zeit, welches statuirt werden kann, da die Zeit gemessen wird durch den Raum.

Es hat lange gedauert, ehe diese Anschauungen so nackt und bloß hingestellt werden durften, und wenn man auch immer schon die Bedeutsamkeit der mathematischen Physik zugestand, so war man doch in mehr profanen Lagen namentlich und vor der Feststellung des Principes von der Erhaltung der Kraft weit davon entfernt, die Bedeutung dieses Zugeständnisses wahrhaft zu ermessen. Aehnlich wie man früher fast ausschließlich von einem mathematischen und physischen Pendel sprach, d. h. wie man zunächst die Gesetze der Schwingungen eines mathematischen Pendels entwickelte und diese sodann auf das physische übertrug, ebenso hat die Physik als Bewegungslehre überall in der Lehre von den früher sogenannten Imponderabilien sowohl wie in der Mechanik die Bewegungsgesetze von immateriellen Punkten und Punktsystemen zu entwickeln und demnächst auf die materiellen Punktsysteme, die Körper, zu übertragen.

In diesem Sinne kann in unserm Buche von Physik nicht die Rede sein; hier kann nur von einer Propädeutik zu einer solchen Bewegungslehre gesprochen werden. Jeder, der Physik studiren will, so lehrt uns die Geschichte der Wissenschaft wie die Erfahrung von heute, hat drei Stadien zu durchlaufen: er muß beobachten, sodann das Gesetzmäßige des Beobachteten feststellen, d. h. die Bedingungen ermitteln, unter denen dieselbe Erscheinung stets wiederkehrt, und er muß endlich das aufgefundene Gesetz erklären, d. h. die Außenwelt durch Maß, Zahl und Formel dem menschlichen Geiste einfügen. Das erste und

zweite Stadium sind natürlich nur die Vorbereitungsstufen des dritten, und insofern nahe an einandergerückt, ja durch die Brücke des Experimentes, die sich fast von selbst ergibt, ganz unmittelbar mit einander verbunden. In der Natur walten nämlich niemals einfache Ursachen und Bewegungen, complicirte Verhältnisse und viele mit einander verbundene Erscheinungen erschweren die Erkenntniß des Gesetzmäßigen, und das Experiment oder die künstlich hervorgerufene für die Beobachtung eigens zubereitete Erscheinung hat daher die Aufgabe, die Bedingungen zu vereinfachen, und wo möglich eine einzige Ursache, welche als Bedingung und vorzugsweise maßgebend für eine bekannte Erscheinung vermuthet wird, in ihren Wirkungen zu studiren.

Wenn hiermit die Natur und Wesenheit des physikalischen Experiments, das nun zugleich auch Basis oder Controle der mathematischen Entwicklung sein kann und muß, hinlänglich charakterisirt ist, so ist zugleich das Experimentiren in den Tag hinein und ebenso das Schulexperiment damit abgewiesen. Ersteres ist heute nur bei Leuten möglich, die nicht einmal den Namen von Dilettanten verdienen, das Schulexperiment aber dient lediglich pädagogischen Zwecken, und will die Anschauung ersetzen, die zur Zeit des Unterrichts nicht unmittelbar aus der Natur herbeigeholt werden kann, gerade so wie bei andern naturwissenschaftlichen Disciplinen Präparate, Felssteine, Krystalle, Modelle und Thier- und Pflanzenkörper herbeigeholt werden, um dem Buchstaben oder dem Worte die lebendige Inscenirung desselben nicht zu entziehen.

Für uns geht aus diesen Erwägungen hervor, daß man nicht zu viel unternimmt, wenn man heute eine Physik lehren will ohne alle Experimente, bloß als Commentar der uns überall umgebenden Naturerscheinungen, da diese durch die Bemühungen unserer Forscher hinlänglich erhellt und aufgeklärt sind, um auch jüngern Leuten und mittelmäßigern Köpfen verständlich mitgetheilt werden zu können. Wenn man namentlich bedenkt, daß

die sogenannnte physikalische Geographie, daß vorzugsweise die Klimatologie nur angewandte Wärme- und Electricitätslehre ist, daß unsere Zimmer und Werkstätten an jeder Stelle mechanische Werkzeuge aufzeigen, daß Trinken, Saugen, Athmen und andere gewöhnliche Lebensverrichtungen auf dem Drucke der Luft beruhen, daß überhaupt physikalische Erscheinungen uns auf Schritt und Tritt begleiten, so kann es nicht zweifelhaft sein, ob in Wahrheit populäre Darstellungen der Physik ohne allen gelehrten Apparat möglich und wünschenswerth sind oder nicht. Wünschenswerth sind sie vor allem deshalb, weil es des vernünftigen Menschen würdig ist, über das nachzudenken, wodurch und womit er existirt, weil es zur Erziehung der Geisteskräfte nothwendig ist, zuerst bei dem Kleinen, Alltäglichen und Gewöhnlichen zu verweilen, damit man geschickt werde, auch das Große und Ungewöhnliche zu enträthseln. Es handelt sich um vernünftige Naturanschauung, um Aufklärung der oftmals so verschwommenen Begriffe des Volkslebens, um Gewöhnung an sinnige Betrachtung und zwar nicht am wenigsten in solchen Kreisen, in denen handwerksmäßiges Schaffen und dumpfes Geistesleben Herzens- und Verstandsbildung nicht wollen aufkommen lassen.

Eine Darstellung der Physik, wie sie in dem vorliegenden Werke festgehalten ist, kann also niemals für die Schule als Unterrichtsbuch gelten sollen, wohl aber als Lesebuch für schon unterrichtete Schüler, damit bei ihnen der schon genossene Unterricht von der ihm nothwendig anklebenden Schuldressur befreit werde, als Lesebuch ferner für angehende Lehrer der Volks- und Mittelschulen, auf daß sie in die schon erworbenen Kenntnisse Concentration und systematische Ordnung hineintragen und so die Masse des Wissenswerthen beherrschen lernen, als Lesebuch endlich für jeden Denkfähigen und Gebildeten, sei es weil ihn eine gehaltvolle Darstellung überhaupt anmuthet, oder weil er das Bedürfniß hat, sich zu unterrichten, ohne den weiten und strengen Weg der Schule durchlaufen zu müssen. — Im Unterhaltungs-

tone ist das Werkchen aber nicht geschrieben, schon um dessentwillen nicht, weil wir von einer derartigen leichten Lectüre keine Frucht erwarten. Was man sich nicht mit einiger Mühe erarbeitet, das kann man auch nicht erhalten, weder im äußern noch im innern Leben, nur der Arbeit Mühe zeitigt bleibende Früchte und spielendes Lernen ist selbst für den gefährlich, den die Mutter Natur mit einer großen und leichten Auffassungsgabe begnadet hat. Unsere Physik soll bedächtig gelesen werden, nicht selten mit der Feder in der Hand. Es sind grundsätzlich keine Figuren beigegeben, damit dieselben aus dem Texte entnommen und zum jedesmaligen Gebrauche hingezeichnet werden. Andrerseits sind aber selbst bei den mathematischen Rechnungen alle Hindernisse beseitigt, und wenn an einzelnen Stellen Sinus, Cosinus und Tangente eingeführt sind, so haben sie genügende Erklärung gefunden, und sind auch nur Abkürzungen, vor denen Niemand zu erschrecken braucht. Vielleicht wird auch mancher Leser das erste Capitel des zweiten Abschnitts ganz überschlagen, und deshalb ist der Vortrag so gehalten, daß es ohne allzugroßen Schaden für das Folgende geschehen kann.

Das Körperliche ist tastbar d. h. es kann an bestimmten Stellen unseres Körpers, namentlich an den Fingerspitzen und den Lippen mit Unterscheidung des Stofflichen durch die Gefühlsnerven wahrgenommen werden. Wir kennen das Körperliche zunächst nur in abgeschlossener Gestalt, als Gegenstand, und können somit sagen, Körper ist jeder tastbare Gegenstand, jedes tastbare Ding. Insofern nun das allen Körpern Gemeinsame die Tastbarkeit ist, welche wir auch als Undurchdringlichkeit erfassen, insofern in demselben Raume nicht zugleich zwei Körper enthalten sein können, erfahren wir einerseits das Verdrängen eines Körpers aus seiner Raumstelle durch einen andern, und erhalten damit den Begriff der Ortsveränderung, der Bewegung und das Ergebniß dieser Bewegung besteht darin, daß der Körper in die Erscheinung tritt. Erschei-

nungen sind also die Resultate von Bewegungen. Erscheinungen werden nicht selten in Folge von Täuschungen durch die Sinne für Körper gehalten; als ein Auskunftsmittel gilt die Probe der Wahrnehmung durch ein oder zwei andere Sinne: was durch wenigstens zwei Sinne wahrgenommen wird, ist ein Körper, das nur durch einen Sinn Wahrnehmbare dagegen eine Erscheinung. Wenn aber andrerseits zwei Körper zu einander in Beziehung treten, so muß das beide Trennende, mithin auch beiden zugleich Gemeinsame, ihre beiderseitige Grenze erfaßt werden. Abstrahirt man von dem, was die Verschiedenheit der Körper bedingt, denkt man bloß an ihre Größe und Gestalt, und denkt man sich ferner die Grenzen einer solchen Größe von einander fortbewegt, so wird die Größe immer größer bis dahin, daß sie unvorstellbar wird und in diesem Falle der Denkbewegung nennen wir den bloß als groß gedachten Körper den Raum, der also unendlich groß, theilbar, stätig und ausgedehnt sein muß. Unendlich groß ist der Raum, weil die Denkbewegung, durch welche er entstanden ist, keine Schranken hat, theilbar aber deshalb, weil die gedachte Bewegung auch als eine ruckweise vorgestellt werden darf, so daß jedesmal wenn die Bewegung innehält, ein Theil abgeschlossen ist, und darum auch stätig weil die Bewegung dort wieder beginnen muß, wo sie aufgehört hatte. Der Begriff des Ausgedehnten umfaßt Theilbarkeit und Stätigkeit zugleich, und kann dahin erläutert werden, daß, um irgend einen Theil zu erreichen, alle vorhergehenden Theile zuvor durchlaufen werden müssen.

In dieser gewiß einseitigen Festsetzung des Raumbegriffes (subjectiver Raumbegriff), in welcher von dem Gegenständlichen, Undurchdringlichen, Tastbaren ganz abgesehen und nur die Größe festgehalten ist, kann also von einem Erfülltsein nicht geredet werden, wir haben also für unser Denken den leeren Raum erhalten; die Erfahrung aber zeigt, daß dieser leere Raum überall

an jedem Punkte erfüllt ist, daß überall das zu finden, was vorhin als das Gegenständliche, Körperliche bezeichnet ist. Erfüllter Raum ist Materie. Die Erfahrung zeigt ferner, daß die Art der Erfüllung eine höchst verschiedene ist, und deshalb führt man den Begriff des Stoffes ein. Was den Raum in gleicher Weise erfüllt, ist Stoff, und begrenzter Stoff ist Körper. Materie, Stoff und Körper entsprechen auch den drei Wissenschaften Physik, Chemie und Naturgeschichte dahin, daß Physik die Lehre von der Materie, Chemie die von den Stoffen und Naturgeschichte die Lehre von den einzelnen Körpern ist, und diese drei Wissenschaften sind die Hauptheile der einen Naturwissenschaft als der Wissenschaft von allem, was im Raume vorhanden und zunächst nicht auf durch Menschen bewirkte Umformungen zurückzuführen ist. Indem aber die Materie zu Erscheinungen in Folge ihrer Bewegungen allein die Grundlage, das Substrat, bietet ist die Lehre von der Materie mit der von der Bewegnng der That nach dieselbe, und somit das oben Gesagte mit der jetzigen Auseinandersetzung nicht im Widerspruche. Die Bewegung ganzer Körper, ganzer Massensysteme wie man sich ausdrückt wird auf das Attraktionsgesetz zurückgeführt: ein Körper zieht den andern an im Verhältnisse seiner Masse, und diese Anziehung nimmt ab oder zu mit der Zu- oder Abnahme der Entfernung. Die Anziehung zwischen den Himmelskörpern ist wesentlich Attraction, die der auf der Erde befindlichen Körper durch die Erde selbst ist Gravitation oder Schwere. Aber auch die Moleküle oder Atome eines Körpers ziehen einander an oder auch die Moleküle zweier verschiedener Körper bei unmittelbarer Berührung, und alles was hieraus hervorgeht, gibt man den Molekülanziehungen hin. Den Zusammenhang der Moleküle eines und desselben Körpers bezeichnet man durch Cohäsion, den Zusammenhang der Moleküle zweier verschiedener Körper durch Adhäsion: Cohäsions- und Adhäsionserscheinungen bieten den Eingang in die Hallen der Chemie, während man die Erschei-

nungen der Massenanziehungen der Himmelskörper — die Physik des Himmels also — der Astronomie zuweist.

Die Mathematik als Größenlehre ist bekanntlich die Grundlage aller Erfahrungswissenschaften, ihr sollten in der gegebenen Entwicklung nachfolgen: Physik, dann Chemie, und schließlich Naturgeschichte. Geschichtlich ist der Verlauf ein anderer gewesen. Naturgeschichtliche Kenntnisse müssen wir dem Aristoteles zugestehen, reicht doch die von ihm herrührende Eintheilung des Thierreichs in sechs Klassen: Säugethiere, Vögel, Amphibien, Fische, Insekten und Würmer bis in die neueste Zeit; chemische Kenntnisse erforderten in bestimmtem Sinne Gewinnung und Gebrauch der Metalle, von der Physik aber wußte man nur die Astronomie zu schätzen und in ausgezeichneter Weise auszubilden: was wir jetzt Physik nennen und oft auch mit dem Namen Mechanik und Molekularphysik bezeichnen, war den Alten unbekannt, wenn man die archimedischen Hebelgesetze ausnehmen will. Auch in neuerer Zeit, die wissenschaftlich als die Zeit der exakten Wissenschaften oder der induktiven Methode bezeichnet werden muß, trat erst Linnée, dann Lavoisier und erst sehr viel später Mayer auf, um diesen Namen als den Begründer der neueren Physik hervorzuheben. Gegenwärtig noch treten wir erst zum Zwecke des Studirens in die Vorhallen der Naturgeschichte und der Chemie, und wenden uns dann zur Physik, um in uns die Kenntnisse in den beiden andern Wissenschaften zu beleben und zu vertiefen, wenn nicht gar Erkenntnisse zu ermöglichen.

Der Forscher in der lebendigen und nicht lebendigen Körperwelt kann der Physik nicht entrathen. Die mechanischen Bewegungen der Bewegungsorgane, die Bewegung der Säfte, der Schlag des Herzens, die Aufsaugung des zubereiteten Nahrungsstoffes durch die lymphatischen Gefäße und der Pflanzennahrung durch die Wurzelfasern, die constante Temperatur des menschlichen und der thierischen Körper, der Bau des Ohres und des Auges sind nur im Lichte physikalischer Theorie zu verstehen.

Die Lagerung der Gesteinsschichten innerhalb der Erdrinde, namentlich ihre mannichfaltigen und seltsamen Biegungen, die nur aus dem Drucke überliegender Schichten zu erklären sind, die Theorie der Erdwärme und der Vulkane, die Einwirkungen des Wassers und der von ihm abhängigen Atmosphärilien auf die Oberflächengestalt der Erde, die Metamorphose der Gesteine und viele Untersuchungen gingen oder gehen noch heute einer genügenden Erkenntniß zu durch perfekte Anwendung physikalischer Erfahrungen. Das enge Verhältniß zwischen Physik und Chemie oder vielmehr die Unentbehrlichkeit jener für diese ist längst erwiesen durch die Unterscheidung der verschiedenen Stoffe nach physikalischen Eigenschaften, und wir haben nur die Diathermansie, Diaphanie, Polarisation und die Spectralanalyse zu nennen, um klar zu machen, daß nur die Physik tiefere chemische Studien möglich macht. Umgekehrt aber bedarf die Physik wie die Mathematik der andern exakten Wissenschaften nicht. Mechanik im engern Sinne, Optik, Akustik, sowie auch die Grundlehren über die Wärme, den Magnetismus und die Elektricität sind in sich allein gefestigt, und die Theorie der Bewegung, auf welcher sie fußen, nimmt mit der Chemie ihren Ausgang von der verständigen Auffassung der Körper als eines Aggregates von Atomen.

Nach Tellkamp's Untersuchungen hat s'Gravesande der atomistischen Theorie den ersten correkten Ausdruck gegeben. Jeder Körper besteht nach ihr aus kleinsten, untheilbaren und für sich allein unwahrnehmbaren Theilchen — Atomen zum Unterschiede von kleinen Massentheilchen, Molekülen, die jedenfalls dem ganzen Körper gleichartig sein müssen, was bei den Atomen nicht der Fall zu sein braucht —, die selbst wieder von einer Wärmeatmosphäre umgeben sind. Diese hypothetische Anschauung ergab sich mit Nothwendigkeit von selbst. Die Atome waren eine Folge der Theilbarkeit der Materie überhaupt und namentlich mit Rücksicht auf die verständige Ueberlegung, daß dieselbe keine unendliche

sein könne; die Wärmeatmosphäre ging aus der Erfahrung hervor, daß alle Körper durch die Wärme ausgedehnt werden, was nur durch die Entfernung der Atome von einander bewirkt werden kann, da sie selbst untheilbar, also auch unausdehnbar oder vergrößerungsfähig sein sollen. Die Porosität der Körper ist also eine Forderung des Verstandes, die in der Erfahrung nicht immer so leicht bestätigt wird, aber doch auch ohne den Versuch der Florentiner Akademie, welche die Porosität des Goldes nachwies, selbst für geschmolzene und flüssige Massen angenommen werden muß. Die Theilbarkeit ist entweder eine mechanische, durch Instrumente hervorgebrachte und darum in gleichartige Theile scheidende oder eine chemische, die den Körper zuerst in seine Bestandtheile trennt, die dann wieder in Atome zu zerlegen sind, um die Art und Weise der Zusammensetzung des der Untersuchung unterworfenen Körpers studiren zu können. So entsteht der Begriff des chemischen Atomes, dem der des Atomgewichtes auf dem Fuße folgt, um die Ungleichartigkeit der Körper festzuhalten. Wie man aber schon früher als Gestalt für alle Atome gleichmäßig die Kugelform gewählt hat, so geht man in unsern Tagen dazu über, auch das Gewicht der kleinsten Körpertheilchen als ein gleichmäßiges zu erfassen und schiebt zu dem Ende unter den Begriff des Atoms noch den der Monas — nach dem Vorgange Leibnitzens, aber in ganz anderem Sinne —, demnach besteht ein Sauerstoffatom aus 16 Monaden Sauerstoff und ein Wasserstoffatom aus 2 Monaden Wasserstoff, und die Sauerstoffmonade hat mit der Wasserstoffmonade gleiches Gewicht und gleiche Gestalt, während ihre stoffliche Verschiedenheit festzuhalten ist.

Wie die Wärmeatmosphäre gegenwärtig ergriffen wird, ist aus dem Werke selbst zu ersehen; hier nur so viel über diesen Punkt, um die Eintheilung desselben in 3 Abschnitte verstehen und rechtfertigen zu können. Wärme ist kein Stoff, Wärme ist Bewegung. Als solche gibt sie sich kund unmittelbar in der Ausdehnung und Zusammenziehung der Körper — man denke

nur an das Thermometer — in den Erschütterungen der Moleküle, die selbst dem Ohre als Schall wahrnehmbar werden, in den Erzitterungen der Moleküle des thierischen, also speciell des menschlichen Körpers, die wir als Wärme und Kälte empfinden und als Zustand denken wollen. Es ist schwer bei der in der Sprache ausgedrückten alten Anschauungsweise über das Wesen der Wärme der neuern richtigern Anschauung in und durch die Darstellung Geltung zu verschaffen, und hieran soll an dieser Stelle erinnert werden, damit der mangelhafte Ausdruck nicht auf die mangelhafte Auffassung schließen lasse.

Die Bewegung, welche wir als Wärme empfinden, wird am leichtesten durch ein entgegentretendes Hinderniß wahrgenommen, man denke nur an den bewegten Hammer im Gegensatze zum unbewegten Amboß, an den durchschnittenen Leitungsdraht der galvanischen Kette, an die Zunahme der Wärme mit der dichter werdenden Atmosphäre. Auch bei den electrischen und magnetischen Erscheinungen erzeugt die Molekularbewegung momentan oder dauernd eine feste Lage und Anordnung der kleinsten Theilchen, aus der dann die Polarität hervorgeht, welche als das Charakteristische dieser Erscheinungen anzunehmen ist. Wärme-, magnetische und electrische Erscheinungen sind daher in dem mit gehinderter Bewegung überschriebenen Abschnitte behandelt. Der kurzen theoretischen Behandlung folgt in der Klimatologie und Meteorologie nicht so sehr die Anwendung als vielmehr die auf der Erfahrung beruhende Grundlage. Im zweiten Hauptabschnitte sprechen wir von der übertragenen Bewegung. Indem nämlich die Wärmelehre zur Dampfmaschine hinführt, muß das Wesen der Maschinen, die in der Uebertragung der Bewegung, sei es abändernd auf schon bewegte oder überleitend auf ruhende Körper, besteht, ihre Herstellung und Wirkungsart Gegenstand der Betrachtung werden. Die Ursache der Bewegung nennen wir Kraft, und die Folge und Wiederkehr

regelmäßiger Bewegungen gibt den Begriff der Zeit; das Verhältniß eines noch abzuschätzenden Weges — wir denken zunächst an die Bewegung eines Punktes — zu dem Wege, welcher als Maß der Zeit festgestellt ist, gibt den der Geschwindigkeit, die in der Erfahrung sich als eine regelmäßige, constante, oder als eine stetig sich ändernde, beschleunigte oder verzögerte, erweist. So entsteht die theoretische Lehre zunächst der fortschreitenden und drehenden Bewegung als Einleitung zur Maschinenlehre, die treibenden Kräfte sind aber Wasser, Wind und Dampf.

Im dritten Abschnitte endlich ist die Wellenbewegung zu behandeln, nicht so sehr, weil die hiermit gegebene periodische Bewegung — man denke nur an das Pendel — der fortschreitenden und drehenden Bewegung als eine dritte aus den beiden vorgenannten combinirte entgegentritt, als weil das Substrat der Bewegung nach vielen Forschern nicht allein mehr die Moleküle des Körperlichen, sondern die des sogenannten Aethers abgeben. Wenn aber deshalb von einer Physik der Materie im Gegensatze zu einer Physik des Aethers gesprochen wird, so bleibt dabei auch für uns unentschieden, ob der Aether ein eigenthümlicher Stoff oder der letzte Vertheilungszustand der wirklichen Materie ist. Die Analogie erfordert letzteres, und wir haben im Anschlusse an Clausius in den ersten Abschnitten kein Bedenken getragen, dieser Anschauung gerecht zu werden, während für den letzten Abschnitt diese theoretische Quälerei nicht weiter beachtet ist.

Hiermit sind Zweck, Plan und Inhalt der vorliegenden „Rationellen Physik des täglichen Lebens“ scizzirt und so weit es hier anging begründet. Wenn der Titelzusatz „des täglichen Lebens“ schon oben seine Rechtfertigung gefunden hat, so soll in Bezug auf den ersten Zusatz „rationell“ nur bemerkt werden, daß damit eine zusammengefaßte, vernünftige Erklärung der einschlagenden Erscheinungen, eine Herleitung der einen aus der

andern gemeint sein soll, ohne den Anspruch zu erheben, überall das Richtige getroffen zu haben. Es ist eben hypothetischen und theoretischen Meinungen und Ansichten nicht ausgewichen, der Leser soll vielmehr zu ihnen in maßvoller Weise hingeleitet werden.

Das Unternehmen, zu welchen uns die Verlagshandlung ermuntert hat, bietet seine eigenthümlichen Schwierigkeiten dar, und es ist nicht zu erwarten, daß die meisten derselben beseitigt sind. Unsere Arbeit ist, wiewohl sie dem vorgelegten Zwecke gemäß nichts Neues darbieten konnte und auf den Forschungen anderer beruhen mußte, dennoch eine neue und originale und wird hoffentlich als solche auch an den Stellen erkannt werden, welche nach ihrem Inhalte als zusammengetragen erscheinen müssen. Ob die Einheit der Darstellung und Erklärungsweise an allen Punkten festgehalten ist, wagen wir nicht zu entscheiden; gestrebt ist nach dieser Seite hin mit allem Eifer, aber erst nach Fertigstellung des Ganzen, auch im Drucke, wird sich darüber ein maßgebendes Urtheil gewinnen lassen. Wir wollen hoffen, daß spätere Verbesserungen möglich sind und einzelne Fehler sich ausgleichen lassen. Die Einheit der Darstellung wird aber nicht durch die Arbeitstheilung unter zwei Verfasser gestört sein. Eine gemeinschaftliche Arbeit empfahl sich aus mehren Gründen, zunächst wohl deßhalb, um durch gegenseitige Correktur die Schwierigkeit eines ersten Entwurfes in engere Grenzen einzuschließen. Wenn die beiden ersten Abschnitte nebst Vorwort und Erklärung der technischen Ausdrücke und Autoren-Verzeichniß dem Unterzeichneten angehören, so hat den letzten Abschnitt Herr Dr. Lampe bearbeitet, und es wird dieses nur deshalb angemerkt, weil jeder von uns das volle Risico der eigenen Leistung tragen will.

Hülfsmittel und Quellen sind meist im Texte angegeben, zum Schlusse sollen jedoch diejenigen Arbeiten genannt werden, auf welche die Verfasser zumeist zurückgegriffen haben. Es sind:

1. Die Lehrbücher von Spiller, Reis, Wüllner, Eisenlohr und Balfour-Stewart.

2. Das chemisch-physikalische Lexikon von Dove, Magnus, Minding &c.
3. Die kleine Mechanik von Bitzel.
4. Die Geographie von Guthe.
5. Die populären physikalischen Vorlesungen von Tyndall („Wärme als Form der Bewegung" und „der Schall").
6. Die Lehre von den Tonempfindungen von Helmholtz und die populären wissenschaftlichen Vorträge desselben Forschers.
7. Die „Naturkräfte" (namentlich „Licht und Farbe" von Pisko und „die Lehre vom Schall" von Radau).

Der sprachlichen Darstellung nach soll der vorliegende Versuch ein populärer im bessern Sinne des Wortes sein, ein solcher also, der einmal nach Hinsicht des Inhaltes jedem Gebildeten leicht zugänglich ist und Interesse einzuflößen vermag, sodann aber in einer gedrängten und präcisen Fassung dem Leser nicht das Nachdenken erspart, sondern ihn dazu nöthigt, wie schon oben angedeutet worden. Das Muster einer solchen Darstellung ist offenbar der Humboldt'sche Kosmos. Da ist keine Phrase, keine schwunghafte Wendung, kein Anrufen des Wundervollen, des Glänzenden; jeder Satz ist Thatsache oder aber sinniger Gedanke mit jener stillbewußten Klarheit, die das Wissen beherrscht und jener würdeovllen Einfachheit, die des äußern Schmuckes entbehren kann. Einem solchen Muster nur nachzustreben ist Verdienst genug und Lob verdient Derjenige, welcher im Hinblick auf dasselbe nicht den Schlechten beigezählt werden muß.

Posen, Ende October 1873.

Fahle.

Inhalts-Verzeichniß.

Zweites Kapitel.

Werkzeuge und Maschinen.

Drittes Kapitel.

Mechanik des Wassers und der Luft.

Dritter Abschnitt.

Die Wellenbewegung.

Erstes Kapitel.

Wellenlehre als gemeinsame Grundlage der Lehren vom Schalle, vom Lichte und der strahlenden Wärme.

Zweites Kapitel.

Vom Schalle.

Drittes Kapitel.

Lehre vom Lichte oder Optik.

Viertes Kapitel.

Von der strahlenden Wärme.

Verbessernder Zusatz zu pag. 7, Zeile 4 von unten:

Die Circumpolarorte haben ein halbes Jahr Tag und ebenso lange Nacht. — Unter den Breiten von 67.3, 69.7, 72.4, 78.2, 83.8, betragen die größten Tageslängen bezüglich 1, 2, 3, 4 und 5 Monate.

Physik des täglichen Lebens.

Erster Abschnitt.

Die Thatsachen und Erscheinungen der gehinderten Bewegung. Klimatologie und Witterungskunde.

Erstes Kapitel.

Zur Orientirung.

Der Mensch lebt von dem Boden, auf dem er steht, und von der Luft, die er athmet; sein äußeres und inneres Wohlbefinden sind abhängig von den Witterungsverhältnissen seines Wohnortes. Diesen schenkt er darum alltäglich seine volle, niemals unterbrochene Aufmerksamkeit, und selten wird er ein Gespräch mit einem Bekannten vorübergehen lassen, ohne Bemerkungen über gutes oder schlechtes Wetter einzuflechten, wie oft man auch eine solche Weise der Unterhaltung verspotten mag.

In der That, nichts ist veränderlicher als das Wetter, und die natürlichen Bedingungen für dasselbe sind so mannigfaltig, daß richtige und scharfe Beobachtungen allein nicht ausreichen, um nur einigermaßen in die Luftgeheimnisse eingeweiht zu werden. Dazu gehört jahrelange wissenschaftliche Arbeit, welche die einzelnen Beobachtungen sammelt und an einander reiht, um sie dann nach bestimmten Grundsätzen, die jedoch selbst erst aus einer ernsten Beschäftigung mit ihnen sich herausstellen, zu regeln, zu ordnen und für verschiedene Zeiten und Orte auszugleichen. Auf diesem mühsamen Wege allein werden einige wenige, allgemein gültige Sätze gewonnen, die nun der allgemeinen Anwendung und dem öffentlichen Gebrauche hingegeben werden kön-

nen. Die sogenannten Bauernregeln, welche zur Kenntzeichnung oder aber zur Vorausbestimmung des Wetters noch alljährlich den Daten unserer Volkskalender beigegeben werden, sind Beispiele für oftmals sehr richtige Anschauungen verständiger und scharf beobachtender Männer, und haben offenbar in ihrer ursprünglichen Form, die uns leider heute nur noch selten zugänglich sein dürfte, wohl zurechtgelegte Vorstellungen wiedergegeben. Zur Zeit sind sie durch fremdartige Beimengungen, durch Uebertragung auf weit entlegene Orte oder auch durch unbestimmte und unwissenschaftliche Begriffe verunstaltet. Daß diese Regeln insbesondere Zusätze religiösen Inhaltes mit sich führen, ist einerseits daraus erklärlich, daß in früheren Zeiten religiöse Anschauungen das Leben wie die Sprache beherrschten, andrerseits aber auch von geringer Gefahr, da sich solche Beigaben in den meisten Fällen leicht entfernen lassen. Wenn z. B. noch heute der ungebildete aber verständige Bauersmann den Satz ausspricht: „Woher der Wind am Charfreitage weht, dorther weht er das ganze Frühjahr", so ist das weder ein Zeichen seines Aberglaubens noch ein Beweis seiner Beschränktheit. Der herrschende Wind des Frühjahres ist in unsern Landen der Nordost, er weht also auch an den meisten Charfreitagen. Die religiöse Färbung, welche der Umkehrung des sachlichen Verhältnisses zu Grunde liegt, ist auch in andern Gebieten eine so gewöhnliche Erscheinung, daß verständiges Nachdenken jedes Verwundern beseitigen wird. — Den Rückschlag der Temperatur im Monat Mai hat frommer Sinn an die Heiligen Mamertus, Pankratius und Servatius — die drei gestrengen Herrn — geknüpft, und vorerst nur damit die Tage des Eintretens feststellen wollen. Die Regel ist indeß zu weit nach Norden gewandert: wo aber statt des 11., 12., 13. Mai zumeist der 25., 26. und 27. Mai als Kältetage eintreten, auch da spricht man noch von denselben drei gestrengen Herrn, nicht selten indeß mit dem allerdings nothwendigen Zusatze „sie haben sich heuer verspätet".

2. Der Veränderlichkeit des Wetters in unsern Breiten steht die Beständigkeit desselben in den Aequatorialgegenden gegenüber. Nach Alex. v. Humboldt's Anmerkungen laden sich die Damen in

Caracas zu geselligen Zusammenkünften „nach dem Gewitter" ein, und geben damit eine ganz genaue Zeitbestimmung. Das Beständige ist jedenfalls leichter zu entziffern als sein Gegentheil. Und hat man zunächst einen ersten Einblick gewonnen, so gelingt es auch, das meist nur scheinbar Regellose wenigstens in so weit zu entwirren, daß verwandte Erscheinungen als zu einander gehörig erkannt werden, und damit eine vorläufige mehr oder minder genügende Erklärung finden, zum mindesten in das Bereich des vernünftigen Nachdenkens gezogen werden.

Zu dieser Art der Forschung, welche namentlich durch Humboldt's Reisen in allgemeine Aufnahme gekommen, tritt die systematische Aufzeichnung von Beobachtungen hinzu, die an zahlreichen Orten nach vorgeschriebener Methode aufgenommen werden. Der genannte große Naturforscher hat auch diese meteorologischen Stationen ins Leben gerufen. Dieselben arbeiten planmäßig an allen wichtigen Punkten der Erde, erstrecken ihre Untersuchungen über alle nähern und entferntern Bedingungen, welche die Witterung beeinflußen, stellen dieselben in Zahlenreihen fest, und ziehen aus diesen die Mittelwerthe, welche dann umgekehrt als der Ausdruck bestimmter Gesetze Geltung gewinnen.

Die Gesammtheit der Witterungsverhältnisse eines Ortes heißt das Klima desselben. Klima bedeutet an und für sich Neigung, Abhang, insbesondere aber die Neigung der Erde zu den Polen hin, wie man sich früher ausdrückte, und von der man gar bald erkannte, daß sie die nächste und allgemeinste Ursache der Witterungserscheinungen sei. Die Gestalt der Erde und ihr Stand zu der licht- und wärmespendenden Sonne ist daher zunächst in Erwägung zu ziehen.

3. Die Erde ist nicht, was sie zu sein scheint, ein scheibenartiger im Weltmeere schwimmender Körper; sie ist kugelförmig, und besteht nach allen Seiten hin abgegrenzt, für sich allein im Raum. Letzteres ergibt sich zunächst aus den Reisen um die Erde, die häufig in der Richtung von West nach Ost gemacht sind, und bei denen man stets an demselben Punkte wieder anlangte, von welchem man ausgegangen war, so wie aus Reisen auf demselben Längenkreise, auf welchem stets neue Sterne über

dem Horizonte emporsteigen. Daß aber die Erde in der That ein kugelförmiger Körper ist, läßt sich mit voller Gewißheit aus der auf allen Meeren gemachten Beobachtung erkennen, nach welcher stets die sichtbaren Horizontalpunkte in einer Ebene und gleich tief unter dem Standpunkte des Beobachters liegen, so daß dieser in Wahrheit überall auf hohem Meere eine Kugelmütze erblickt — Herabgedrückter Horizont. — Hiernach müßte die Erde eine Kugel sein. Das ist indeß nicht der Fall. Genaue Gradmessungen ergeben einen Unterschied des Erddurchmessers in der Richtung von Nord nach Süd (Erdaxe) gegen die von West nach Ost — Aequatorialdurchmesser. Ist l die Länge des ersteren, so ist $l + {}^1/_{300}\, l = l\,(1 + {}^1/_{300})$ die Länge des letzteren, und man kann daher mit Bessel die Abplattung der Erde durch die Zahl ${}^1/_{300}$ im Gedächtnisse festhalten.

Um das Verhältniß der Erde zur Sonne für unsern Zweck näher zu erläutern, reicht es aus, von der scheinbaren Bewegung der Sonne um die Erde, wie wohl die entgegengesetzte Bewegung in Wirklichkeit stattfindet, die in Frage kommenden Thatsachen abzuleiten. Wenige Stunden der Beobachtung zeigen am gestirnten Himmel einen Punkt in der Nähe des sogenannten Polarsternes, um den sich alle Sterne und das ganze Himmelsgewölbe in der Richtung von Ost nach West herumdrehen. Denkt man sich diesen Punkt mit dem Mittelpunkte der Erde verbunden, so erhält man eine feste Linie, die Himmelsaxe, deren innerhalb der Erde fallender Theil die Erdaxe heißt. Die Endpunkte der letztern auf der Oberfläche der Erde heißen Pole, und jeder durch die beiden Pole gehende größte Kreis — ein Kreis, dessen Mittelpunkt mit dem Mittelpunkt der Erde zusammenfällt — ist ein Mittagskreis oder ein Meridian. Die Mitten aller Meridianhalbkreise, deren Endpunkte die Pole sind, bilden einen zweiten größten Kreis, den Aequator. Den vierten Theil eines Meridiankreises, der also zwischen einem Pole und dem Aequator liegt, theilt man in 90 Grade (^{0}) und denkt sich durch jeden Theilpunkt eine zur Aequatorebene parallele Ebene gelegt, die nun auf der Erdoberfläche den entsprechenden Parallelkreis

abgibt. Die Meridiane schneiden den Aequator und zählen auf ihm die Grade, während die Parallelkreise die Grade des Meridians zählen. Meridiangrade sind kleiner als Aequatorgrade, und da man gewohnt ist, von zwei Ausdehnungen die größere die Länge, die kleinere die Breite zu nennen, so heißen die Meridiane auch Längenkreise, weil sie Grade der Länge zählen, und die Parallelkreise nennt man in gleicher Weise Breitenkreise, weil sie Grade der Breite abschneiden. Zu beiden Seiten des Aequators liegen in einer Entfernung von 23° 30′ die Wendekreise, nördlich der Wendekreis des Krebses, südlich der des Steinbocks, weitere 43 Grade nach Norden und Süden construirt man die beiden Polarkreise.

Die Sonne ist Licht- und Wärmequelle und erleuchtet zu jeder Zeit eine Erdhälfte. Die Erscheinung der Mondfinsternisse beweist zwar, daß die Erde als der kleinere Himmelskörper einen kegelförmigen Schatten wirft, indeß ist die Sonne doch so weit von ihr entfernt, daß für die nachfolgenden Erörterungen die Sonnenstrahlen als parallel ausgehend und auffallend betrachtet werden dürfen, und die Annahme einer erleuchteten und erwärmten Erdhälfte gestattet ist. Steht nun die Sonne über dem Aequator, so geht der größte Kreis, welcher die erleuchtete Erdhälfte von der dunkel gelassenen scheidet, durch die Mitten aller Parallelkreise, und es muß somit jeder Punkt der Erde, weil sie von der Sonne in 24 Stunden umkreiset wird, 12 Stunden Tag und 12 Stunden Nacht haben. Steht dagegen die Sonne über einem Wendekreise — und über diesen geht sie nicht hinaus —, so theilt der Erleuchtungskreis alle Parallelkreise in zwei ungleiche Theile; es ist der ganze nördliche Polarkreis erleuchtet, und jeder Bewohner desselben hat 24 Stunden Tag, wenn der gedachte Wendekreis der des Krebses war. Vom ersten Termine bis zum letzten nehmen also auf der nördlichen Halbkugel die Tageslängen zu, die Längen der Nacht ab, die Bewohner innerhalb des Polarkreises sehen während dieses und des folgenden Vierteljahres die Sonne beständig über dem Horizonte; sie haben eine Tagesdauer von einem Halbjahre. Dem längsten Tage muß überall nach einem halben Jahre der kürzeste Tag

entsprechen. Am längsten Tage steht die Sonne im höchsten Punkte über dem Horizonte, am kürzesten also im niedrigsten Punkte. Der Höhenunterschied beträgt 47 Grade eines Meridians am Himmelsgewölbe, d. h. die Sonne scheint sich um die Erde in einer kreisförmigen Bahn zu bewegen, welche die Aequatorebene unter einem Winkel von 23° 30′ schneidet.

Die Zeit, in welcher diese Bewegung vollführt sich zeigt, nennen wir ein Jahr. Wir haben mithin vier Jahreszeiten, Frühling, Sommer, Herbst und Winter. Die Sonnenbahn ist aber kein Kreis; die Sonne steht vielmehr im Sommer weiter von der Erde ab als im Winter, sie bewegt sich also während dieses schneller als während des Sommers, so daß der Unterschied der beiden Halbjahre gegen 8 Tage beträgt. Wir zählen nämlich:

im Winter	89	Tage	1	Stunde
„ Frühling	92	„	22	„
„ Sommer	93	„	14	„
„ Herbst	89	„	17	„
	365	„	6	„

so daß Frühling und Sommer 186 Tage 12 Stunden zählen, während auf Herbst und Winter 178 Tage 18 Stunden entfallen. Die Differenz zwischen beiden ist also 7 Tage 18 Stunden.

Anmerkung. Dem gewöhnlichen Sprachgebrauche entsprechend, ist im Vorhergehenden das Wort „Tag“ in zweifacher Bedeutung genommen; einmal bezeichnet es die Zeit, in welcher der Erdbewohner die Sonne über dem Horizonte sieht, das andere Mal aber diejenige, welche zwischen zwei auf einander folgenden höchsten Standpunkten der Sonne am Himmel verläuft. Dieser letztere Zeitraum heißt der astronomische Tag und er zerfällt in 24 Stunden. Das Jahr enthält 365,2422 solcher Tage oder 365 Tage 5 Stunden 48 Minuten 50 Sekunden. — Die scheinbare Bewegung der Sonne besteht in Wirklichkeit nicht; die Erde hat vielmehr eine zweifache Bewegung, einmal um ihre Axe in je 24 Stunden, und dann um die Sonne selbst, die in einem Jahre vollbracht wird und von der anziehenden Kraft der Sonne herstammend gedacht werden muß. Letztere Bewegung ist in der Sonnennähe eine schnellere als in der Sonnenferne. Die Punkte dieser Nähe und Ferne auf der Erdbahn — die sogenannten Apsiden — sind nicht von unveränderlicher Lage. Vor ungefähr 5800 Jahren waren Sommer- und Winterhalbjahr auf der nördlichen und südlichen Erdhälfte

einander gleich, dasselbe wird im Jahre 6470 stattfinden, und im Jahre 11700 wird die südliche Erdhälfte sogar einen um 8 Tage längern Tag haben, als die nördliche ihn zur Zeit aufweist. Die Länge des astronomischen Tages ist seit Hipparch (150 v. Chr.) unveränderlich geblieben.

4. Den angeführten Thatsachen zufolge unterscheidet man auf der Erdoberfläche verschiedene Zonen, und zwar heißt der Gürtel zu beiden Seiten des Aequators bis zu den Wendekreisen hin die heiße Zone. Zwischen den Wende- und Polarkreisen liegen nördlich und südlich die gemäßigten und innerhalb der Polarkreise endlich die beiden kalten Zonen. Der Wechsel der vier Jahreszeiten kann sich in der gemäßigten Zone am augenfälligsten vollziehen: zwischen den Wendekreisen, oder unter den Tropen herrscht der Sommer, in der kalten Zone der Winter vor. Der Frühling entfaltet seine schönste Pracht etwa bis zum 50. Breitengrade, von welchem ab der Uebergang vom Winter zum Sommer immer jäher erfolgt. Der Herbst waltet vorherrschend als schöne Jahreszeit über dem 50. Grade, bis er allmählig in die starre Winternacht des hohen Nordens übergeht oder vielmehr in ihr verschwindet. Je weiter nach Norden, desto länger werden die Tage, desto höher steigt die Temperatur eines Sommertages, desto schneller reifen die Früchte, aber auch nur diejenigen, welche, wie die Gerste, einer kürzeren Entwicklungszeit zwischen Aussaat und Erndte benöthigt sind. Der Bau des Roggens verlangt zumeist neun Monate zweckentsprechender Witterung; wo eine solche nicht mehr vorhanden, erfolgt eine geringe Ausbeute, man geht zum Sommerroggen über, und gibt auch diesen mit dem 62. Grade ganz auf.

Mit zunehmender Höhe über der Meeresfläche erniedrigt sich die Wärme. Daher liegen die Hochländer und Gebirgsriesen unter den Tropen, die Tiefländer aber im Norden der Continente; erstere mäßigen die heiße Sonnengluth, letztere ermöglichen noch ein erträgliches Klima unter Breiten, die ihrer Höhe halber Unwohnlichkeit und Unfruchtbarkeit vermuthen lassen. Von welcher Bedeutung aber die größere Länge des Sommers auf der nördlichen Erdhälfte ist, wird man ungefähr aus der Notiz entnehmen können, nach welcher die Sonne einem preußischen

Morgen Landes über 50 Billionen Wärmeeinheiten im Verlaufe eines Jahres zuführt.

Die Thatsache, daß mit Zunahme der Höhe die Wärme sich mindert, tritt dem bloßen Schein so sehr entgegen, daß schon an dieser Stelle einiges Verständniß derselben vorbereitet werden muß, wenn auch erst im Folgenden, wo über die strahlende Wärme gehandelt wird, ihre ganze Bedeutung übersehen werden kann. Die Erklärung Helmholtz' möge vorläufig genügen: „Unsere Atmosphäre ist wie eine wärmende Decke über die Erde ausgebreitet, sie ist für die leuchtenden Wärmestrahlen (Licht) fast vollkommen durchgängig und läßt sie ohne merkliche Hinderung herein. Aber sie ist nicht gleich gut durchgängig für die dunklen Wärmestrahlen, welche, von den erwärmten irdischen Körpern ausgehend, wieder in den Weltenraum zurückstrahlen. Diese werden von der atmosphärischen Luft verschluckt, namentlich da, wo sie feucht ist. Dadurch erwärmt sich die Luftmasse selbst und gibt die gewonnene Wärme in der Richtung nach dem freien Weltenraume hin ab. Die Abgabe der Wärme ist also verzögert im Verhältniß zur Einnahme, und dadurch wird ein gewisser Wärmevorrath an der Erdoberfläche festgehalten. Ueber hohen Gebirgen ist aber die schützende Decke der Atmosphäre viel dünner, dort kann die ausstrahlende Wärme des Erdbodens viel schneller in den Weltenraum zurück entweichen, dort ist also auch der aufgespeicherte Wärmevorrath und die Temperatur viel geringer als in der Tiefe. Dazu kommt noch eine andere Eigenthümlichkeit der Luft, welche in demselben Sinne wirkt. In einer Luftmasse nämlich, welche sich ausdehnt, verschwindet ein Theil ihres Wärmevorrathes, sie wird kühler, wenn sie nicht neue Wärme von unten her aufnehmen kann. Umgekehrt wird durch erneuetes Zusammendrücken der Luft dieselbe Wärmemenge wieder erzeugt, welche durch die Ausdehnung verschwunden war. Wenn also z. B. Südwinde die warme Luft des Mittelmeeres nach Norden treiben und sie zwingen, zur ganzen Höhe des Gebirgswalles der Alpen hinaufzusteigen, wo sich die Luft, entsprechend dem durch das Barometer angezeigten Luftdrucke, etwa um die Hälfte ihres Volumens ausdehnt, so kühlt sie sich dabei auch beträchtlich ab, für

eine mittlere Höhe des Gebirges von 3600 Meter um 16—25 Grad, je nachdem sie feucht oder trocken ist, und dabei setzt sie auch gleich den größten Theil ihrer Feuchtigkeit als Regen oder Schnee ab. Kommt dieselbe Luft nachher auf der andern Seite des Gebirges als Föhnwind wieder in die Thäler, so wird sie wieder verdichtet und erwärmt sich auch wieder. Derselbe Luftstrom also, der diesseits und jenseits der Alpen warm ist, ist schneidend kalt auf der Höhe und kann daselbst Schnee absetzen, während wir ihn in der Ebene unerträglich heiß finden." Diese Erklärung der mit der Höhe abnehmenden Wärme ist der Art, daß jedermann beim ersten Lesen die Schwierigkeit fühlen wird, sie sich ganz anzueignen, sie ganz und gar verständig zu ergreifen; sie steht in der Einleitung zur Orientirung, um ein Beispiel zu geben, was die eigentlichen Ziele der nachfolgenden Erörterungen sein wollen.

5. Die Sonne als Quelle der Wärme ist somit eine Hauptursache der verschiedenen klimatischen Verhältnisse auf der Erde. Diese aber besteht aus einem Kerne, dem die meisten Naturforscher eine heiße, zähflüssige Wesenheit zuschreiben, sodann aus einer diesen Kern über- und umlagernden Rinde mit einer Dicke von circa 75 Kilometern und einem die feste und flüssige Hülle nochmals umhüllenden Luftmeere, dem ältere Forscher ebenfalls eine Höhe von ungefähr 60 Kilometern, neuere meist das Doppelte oder Dreifache zuweisen. Die feste Erdrinde hat bekanntlich Tiefen und Höhen, Thäler und Gebirge. Die großen Tiefen zwischen den Gebirgscontinenten füllt ganz und gar das Meer aus, welches zu $^2/_3$ die Erdoberfläche bedeckt. Luft- und Wassermeere sind die Regulatoren des Klimas, indem sie in Folge der flüssigen Natur ihres Stoffes Strömungen ermöglichen, welche die Wärmeunterschiede weit von einander gelegener Länder ausgleichen.

Wenn man aber das feste Land und das flüssige Wasser mit dem Gesichtssinne wahrnimmt, so ist das Dasein der Luft viel schwerer zu erkennen, namentlich die eine ihrer Eigenschaften, die Schwere, welche sie mit allem Körperlichen gemein hat. Bewegte Luft, Winde also, Stürme und Orkane, kannte man schon

längst. Ob man freilich von ihrem Wesen eine richtige Vorstellung hatte, muß allerdings sehr fraglich erscheinen, da man von der Wesenheit dessen, was als bewegt wahrgenommen wurde, nichts wußte. Erst als 1643 Toricelli den (Luft-) Schwermesser, das Barometer, erfand, war dieses Problem als gelöst anzusehen. Man legte dem genannten Physiker nämlich die Frage vor, weßhalb das Wasser in lothrechtstehenden Röhren nicht höher als ungefähr 10^{m} emporsteige, da doch nach dem alten Grunde für diese Erscheinung, sofern sie geringere Höhen betraf, dem aristotelischen Grundsatze „die Natur hat eine Scheu vor dem leeren Raume", dieses Emporsteigen unbegrenzt stattfinden müsse. Toricelli nahm statt des flüssigen Wassers das ebenso flüssige, aber $13^1/_2$ mal schwerere Quecksilber, füllte damit eine 1^{m} lange und oben offene Röhre, verschloß darauf das offene Ende mit dem Daumen, kehrte die Röhre um und tauchte sie in ein andres, mit Quecksilber nahezu gefülltes ziemlich weites Gefäß. Anstatt der analogen Erscheinung bei einer gefüllten Wasserflasche, die, mit dem offenen Halse in Wasser getaucht, keinen Ausfluß zeigt, zeigte sich nun hier ein rasches Ausfließen bis zu dem Punkte, daß die Höhe des Quecksilbers in der lothrecht gehaltenen Röhre noch 760^{mm} zeigte. Diese Höhe wurde nun nicht mehr vermindert. Der Schluß lag nahe, daß die Oberfläche des Quecksilbers im weiten Gefäße anfänglich gehoben wurde, später aber nicht mehr gehoben werden konnte; es mußte also ein, wenn auch unsichtbarer Körper, über ihr anfangs zurück weichen, und sich dann nicht mehr zurück drängen lassen. Mit einem Worte, die über der Quecksilbermasse im weiten Gefäße ruhende Luft hielt einer Quecksilbersäule von 760^{mm} das Gleichgewicht. Man spricht deßhalb von einem Luftdruck von 760^{mm} = einer Atmosphäre. Die angegebene Höhe ist veränderlich, wenn auch in verhältnißmäßig geringen Grenzen. Die Aenderungen der Wärme bedingen zumeist auch die Aenderungen der Quecksilberhöhe im Barometer, und um den Luftdruck zu controliren, muß jeder Barometerstand bei einer bestimmten Wärmemenge angegeben oder auf eine solche zurück geführt werden, will man anders vergleichbare Resultate den klimatologischen Erörterungen unterbreiten.

Anmerkung. Französische Physiker vergleichen gern und nicht ungeschickt die Größenverhältnisse der Erde, ihrer Rinde, ihrer Thäler und Berge, mit dem Kerne einer Citrone so wie mit der Rinde und den Runzeln an dieser; sie vermitteln damit eine Anschaulichkeit, die bei so schwierigen Gegenständen niemals unwillkommen ist.

Die Wärme ist, wenn nicht Ursache, doch stete Begleiterin zweier andrer Erscheinungsreihen, welche bei der Klarlegung klimatischer Verhältnisse wohl zu beachten sind, mehr noch, die man studiren muß, um die Bedingungen der klimatischen Vorgänge genau erforschen zu können. Man braucht nur an die Gewitter zu erinnern und an die Thatsache, daß diejenigen Punkte der Erde, an welchen die magnetische Kraft sich am größten erweist, zugleich Punkte der größten Kälte sind, und umgekehrt, um den angedeuteten Zusammenhang in größeren Zügen darzulegen. Die Summe aller dieser Erörterungen wird sich in dem Verständnisse einer kleinen Anzahl von Instrumenten vereinigen, von denen wir beispielsweise das Thermometer, das Barometer, das Hygrometer, den Regenmesser und die Inklinations- und Deklinationsnadel nennen. Hiermit ist der Umfang der ersten Abtheilung hinlänglich umschrieben.

Zweites Kapitel.

Die gehinderte Molekularbewegung.

Wärmeerscheinungen.

6. Wärme ist für uns 1. die Ursache der Empfindungen des Kalt- und Warmseins und 2. die der Ausdehnung der Körper. Die Wärmempfindungen sucht man zumeist durch die Begriffe „eisig, kalt, lau, warm, heiß, siedend heiß, und mit Zuhülfenahme des Gesichtssinnes glühend, rothglühend, weißglühend" zu kennzeichnen, doch werden durch dieselben die graduellen Unterschiede allerdings nicht in feste Grenzen eingeschlossen. Die Empfindung des Lauwarmen ist dem menschlichen Körper am ge-

nehmsten, Wärmeerregungen unter derselben bezeichnet man gewöhnlich mit kalt, mit warm dagegen, sobald sie über das laue hinausgehen.

Die zweite Folge der Wärme ist die durch sie bewirkte Raumausdehnung aller Körper ohne Unterschied, und ihrer bedient man sich sofort, um einen zweckmäßigen Meßapparat für die Wärme herzustellen. Wenn auch des Thermometers und seiner verschiedenen Abänderungen später gedacht werden soll, so muß doch an dieser Stelle das Wichtigste über dieses erste aller physikalischen Instrumente beigebracht werden. Schon im Anfange des 17. Jahrhunderts will der Holländer Drebbel eine Art Luftthermometer erfunden haben. Dasselbe entbehrte jedoch der Skala, d. h. einer vergleichbaren, durch Theilstriche bewirkten Eintheilung. Hundert Jahre später fertigten Fahrenheit aus Danzig und Réaumur aus La Rochelle die ersten anwendbaren und noch heute im Gebrauche befindlichen Wärmemesser. Die Idee des Instrumentes beruht auf dem Erfahrungssatze, daß die Länge einer Weingeist- oder Quecksilbersäule im schmelzenden Eise oder in Dämpfen, welche siedendem Wasser entsteigen, unverändert bleibt. So entstehen zwei feste Punkte, deren Abstand man nach Réaumur in 80, nach Fahrenheit in 180, und nach Celsius in 100 Grade (°) eintheilt. Die Eintheilung wird über und unter diesen Punkten in gleicher Weise fortgesetzt. Am unveränderlichen Kälte- (oder Eis-) Punkte steht bei Reaumur und Celsius 0, bei Fahrenheit 32; der Siedepunkt ist bei Réaumur 80, bei Celsius 100, bei Fahrenheit 212. Der Nullpunkt der Fahrenheit'schen Skala ist der künstliche Gefrierpunkt. Unter 0 verzeichnen alle Skalen negative (—), über demselben positive (+) Grade. Das Réaumursche Thermometer ist jetzt wie das Celsius'sche mit Quecksilber gefüllt; ersteres ist für den gewöhnlichen Hausgebrauch, letzteres dient ausschließlich wissenschaftlichen Angaben. Das Fahrenheit'sche Thermometer wird im hohen Norden gebraucht, weil seine Füllung, der Weingeist, nicht gefriert.

Da die Zahlen 80, 100, 180 die Brüche $\frac{4}{5}$, $\frac{4}{9}$, $\frac{5}{9}$ und ihre reciproken Werthe $\frac{5}{4}$, $\frac{9}{4}$, $\frac{9}{5}$ abgeben, so erhält man stets

bei einer leichten Ueberlegung durch Anwendung dieser Werthe die Reduktionen der verschiedenen Thermometergrade auf einander. Die einschlägigen Formeln sind:

$$n^0\,R = \frac{5}{4}\,n^0\,C = \left(\frac{9}{4}\,n + 32\right)^0 F$$

$$n^0\,C = \frac{4}{5}\,n^0\,R = \left(\frac{9}{5}\,n + 32\right)^0 F$$

$$n^0\,F = \frac{4}{9}\,(n - 32)^0\,R = \frac{5}{9}\,(n - 32)^0\,C$$

in denen n die Anzahl der Grade bedeutet, und positiv oder negativ genommen werden darf. Hiernach sind, um drei schwierige Anwendungen zu geben:

$$(-4)^0\,R = \left(-\frac{5}{4}\cdot 4\right)^0 C\ [-5^0] =$$

$$\left(-\frac{9}{4}\cdot 4 + 32\right)^0 F\ [+23^0]$$

$$(-7)^0\,F = (-7 - 32)\cdot\frac{4}{9}^0\,R\ [-17\tfrac{1}{3}{}^0] =$$

$$(-7 - 32)\cdot\frac{5}{9}^0\,C = [-21\tfrac{2}{3}{}^0]$$

und der Gefrierpunkt des Quecksilbers ist bei Celsius $= -40^0 = -32^0\,R = -40^0\,F$.

Es entsteht nun die Frage, ob dieselbe Wärmemenge erforderlich ist, um das Thermometer von 5^0 bis 10^0 steigen zu lassen, wie die, welche es etwa von 30^0 bis 35^0 steigen macht. Früher wurde diese Frage durch den Satz „der Gang der Wärme ist der Ausdehnung unbedingt proportional oder auch eine dreifache Wärmemenge gibt eine dreifache Ausdehnung" ohne weiteres bejaht, heute weiß man, daß das nicht der Fall ist, und, wenn auch die Abweichungen, nach denen bei höheren Wärmegraden größere Wärmemengen erforderlich sind, um bestimmte Ausdehnungen zu erhalten, nur innerhalb kleiner Grenzen sich bewegen, so müssen dieselben doch bei einzelnen Untersuchungen wohl berücksichtigt werden. Die Abweichungen sind erkannt worden, als man das Weingeist- und Quecksilberthermometer an einem Luft-

thermometer erprobte. Ein solches hat zuerst in brauchbarer Form Gay-Lussac hergestellt; es ist von derselben Gestalt, wie das gewöhnliche Thermometer, die Röhre jedoch, in der trockene Luft durch einen Quecksilbertropfen abgesperrt ist, viel länger.

Hohe Grade der Wärme mißt man durch sogenannte Pyrometer. Ein Gefäß, das ganz mit trockener Luft gefüllt ist und in eine feine Spitze ausläuft, wird an den Ort der Wärme gebracht, dann fortgenommen und mit der Spitze sofort in Quecksilber getaucht, dessen eindringende Masse mit der ganzen Masse, die in das Gefäß hineingeht, verglichen wird. Daraus macht man einen Rückschluß auf die stattgefundene Ausdehnung der Luft im Gefäße, und somit auch auf den Grad der Wärme, welcher dieser Ausdehnung entspricht.

7. Gemessene Wärme ist Temperatur. Man spricht von hohen und niedern, von constanten und veränderlichen Temperaturen. Die Beständigkeit des Eis- und Siedepunktes ist so eben zur Verwendung gekommen; constant ist auch die Blutwärme des menschlichen Körpers, 36^0—37^0, und Aenderungen desselben deuten auf Krankheiten hin, deren Größe und Heftigkeit meist nach der Zahl der Pulsschläge bemessen wird, am besten jedoch durch direkte Thermometermessungen. Von einem bestimmten Punkte unter der Erdoberfläche, der nach den verschiedenen Breiten variirt, anfangend findet nach der Tiefe hin eine Zunahme, nach der Höhe hin aber eine Abnahme der Temperatur statt. Feste Gesetze sind bisher nicht ermittelt. Bei der Zunahme der Wärme nach dem Erdinnern gibt man gewöhnlich die Zahl 40^m auf 1^0 an; bei der Abnahme der Wärme nach oben muß man bestimmte Orte und bestimmte Zeiten hinzusetzen. So ist beispielsweise für die Gegend von Genf bis zum großen St. Bernhard bekannt, daß man im Juli 230^m im December aber 400^m steigen muß, um das Thermometer 1^0 fallen zu sehen.

Im Meere nimmt die Temperatur von der Oberfläche mit zunehmender Tiefe ab, selbst unter den Tropen sinkt sie bis wenige Grad über dem Gefrierpunkte. Skoresby und Sabine haben in der Baffinsbai bei Tiefen von 1300 bis 2000 Meter

1 bis 3 Kältegrade wahrgenommen, während ersterer im grönländischen Meere bei 1300 Meter noch 4° Wärme fand.

Constant sind auch die Temperaturen solcher Quellen, die aus hinreichenden Tiefen entspringen, was mit der zunehmenden Wärme nach dem Mittelpunkte der Erde zu in Verbindung zu bringen ist. In einer Tiefe von 40. 1500 ^{m} = 60000 ^{m} = 60 Km. herrscht somit die Temperatur des schmelzenden Eisens, wenn deren mittlerer Werth 1500° ist (siehe weiter unten). Auf der Oberfläche der Erde sind die mittlern Jahrestemperaturen unter dem Aequator nahezu constant; nach Nord und Süd hin verliert sich diese Gleichmäßigkeit, bald sind nur 2, bald nur 3 und mehrjährige Mittelwerthe unveränderlich: im nördlichen wie mittlern Deutschland weichen erst 10jährige Mittel nicht von einander ab. In Breiten von 3 bis 19 Graden ändert sich die Mittel-Temperatur des Meerwassers an der Oberfläche noch um 1° C, zwischen dem 20. und 45. Parallel ist die Größe dieser Abänderung schon 5°.

Wenn Luft als die beste thermometrische Substanz sich ausweist, wenn Quecksilber für mittlere und Weingeist für tiefe Lufttemperaturen brauchbar und zuverlässig erscheinen, so ist der eigentliche Grund für diese Thatsache der, daß nur dann der Gang der Wärme mit der Ausdehnung des Körpers gleichmäßigen Schritt hält, wenn die Natur des Körpers während der Ausdehnung sich nicht abändert. In der Nähe der Aenderungspunkte treten große Unregelmäßigkeiten auf, und hierfür liefert das Wasser ein um so merkwürdigeres Beispiel, als dasselbe für den Haushalt der Natur von den großartigsten Folgen ist. Die Thatsache, daß Eis auf Wasser schwimmt, während fester Schwefel oder feste Metalle in den geschmolzenen gleichartigen Massen zu Boden sinken, findet ihre hinlängliche Erklärung in dem durch direktes Messen der betreffenden Ausdehnungen gewonnenen Ergebnisse, daß Wasser von 4° dichter ist als solches von 0° und dieses noch gleiche Dichtigkeit mit dem von (— 8°) hat. Das Schwerere sinkt allemal im Leichtern, und wenn daher im Winter das Wasser erkaltet, so sinkt es zu Boden, während das Bodenwasser sich zur Oberfläche erhebt. So erhält allmälig

die ganze Wassermasse eines Teiches die Temperatur von 4°. Sinkt diese noch tiefer, so finden die frühern Strömungen nicht mehr statt, die Oberfläche des Wassers erkaltet bis auf 0° und gefriert: die sich bildende Eisdecke aber schützt das Wasser unter ihr vor weiterm Erkalten und gänzlichem Gefrieren, so das Leben in ihm erhaltend. Bei strömenden Gewässern findet ein andrer Vorgang statt. Die Erkaltung der ganzen Masse bis zum Gefrierpunkte ist bei verhältnißmäßig geringen Wassertiefen möglich, und findet auch bei ganz kleinen Bächen statt, bei andern erkalten die Ufer und die Seiten und der Grund des Flußbettes eher als das Wasser, an den festen Theilen des Flußbettes beginnt die Eisbildung, das Eis wird aber von dem strömenden Wasser emporgerissen und an die Wasseroberfläche geführt, die nun weit leichter gefriert als wenn sie vom Grundeise frei geblieben wäre. So ist einerseits der unregelmäßige Gang der Ausdehnung beim Wasser der Grund, daß die irdischen Wasser nicht ganz gefrieren, daß sie flüssig bleiben, und daß das Thier- und Pflanzenleben in ihnen erhalten wird, während andrerseits das in Felsen und Erde eingedrungene Wasser noch ferner gefriert und die dadurch gewonnene Ausdehnung die Ursache des Zersprengens, Verwitterns und Auflockerns von Felsen und Ackererde wird. So wird stets aus Felsen neue fruchtbare Ackererde gewonnen, so wird die schon vorhandene in des Winters Eis und Kälte aufgelockert und für den einzustreuenden Samen zubereitet, indem die in den lockern Boden eindringende atmosphärische Luft die Bildung von Kohlensäure ermöglicht, und so den Boden erwärmt, und die Zersetzung seiner Bestandtheile vermittelt und befördert.

8. Wie im Haushalte der Natur, so ist die Ausdehnung der Körper durch die Wärme für Künste und Gewerbe eine höchst wichtige Thatsache. Metallene Gefäße, eiserne Stangen, Zink- und Kupferplatten müssen so hingelegt werden, daß der Ausdehnung Rechnung getragen wird. Umgekehrt legt man um hölzerne Räder eiserne Ringe in glühendem Zustande, damit sie sich nach dem Erkalten zusammenziehen und somit fest aufsitzen. Ist die Ausdehnung nicht berücksichtigt, so findet ein Zerreißen statt.

Man denke beispielsweise an gläserne Lampencylinder, die beim schiefen Aufsetzen einseitig sich erwärmen und dann zerspringen, da die Ausdehnung der erwärmten Stelle ein Hinderniß in der Sprödigkeit der nicht erwärmten findet. Eine weitere Anwendung findet die Ausdehnung in den sogenannten Compensationspendeln und Compensationsstreifen. Wenn aneinander gelöthete Eisen- und Messingstreifen bei gewöhnlicher Temperatur eine grade Linie bilden, so krümmt sich diese bei höhern Wärmegraden nach Seite des Eisens hin, welcher Umstand durch einen Zeiger auf einem Zifferblatte bemerklich gemacht werden kann — Metallthermometer. — Das rostförmige Compensationspendel hat 4 Streifen, von denen die beiden äußern nach unten sich ausdehnen, die beiden innern dagegen nach oben, während die an dem Bügel der letztern wiederum befestigte eigentliche Pendelstange sich mit den äußern Stangen gleichmäßig nach unten ausdehnt, alles in Folge der rostförmigen Anordnung. Haben die nach unten gerichteten Ausdehnungen die halbe Größe der nach oben gehenden, so bleibt die Pendellänge stets ungeändert, und der Gang des Uhrwerks regelmäßig.

Die Ausdehnung genau zu ermitteln und theilweise zu berechnen ist eine höchst mühevolle Arbeit, die vermittelst geistreicher Verwendung des Fernrohres oder des Mikroscops bewirkt worden ist (La Place, Roye und Fizeau). Alle Untersuchungen haben zuverlässig ergeben, daß die Ausdehnung mit der Erwärmung zwischen dem Eis- und Siedepunkte nicht nur gleichen Schritt hält, sondern daß sie auch ganz genau auf den frühern Raum zurücktritt, falls die Temperatur durch Erniedrigung die ehemalige Größe wieder erlangt hat. Wenn man ähnlich wie oben im §. 3 die Länge eines Körpers bei 0^0 durch l und durch r den Zuwachs der Länge bei 100^0 bezeichnet, so ist die ganze Länge offenbar $l + r = l\left(1 + \frac{r}{l}\right)$. Man nennt nun die meist sehr kleine Zahl $\frac{r}{l}$ den Ausdehnungscoefficienten. Ist ferner l die Seite eines Würfels, so ist das Volumen desselben nach der Erwärmung auf 100^0

$$=l^3\left(1+\frac{r}{l}\right)^3=l^3\left\{1+\frac{3r}{l}+\frac{3r^2}{l^2}+\frac{r^3}{l^3}\right\}=l^3\left\{1+\frac{3r}{l}\right\}$$

weil $\frac{r^2}{l^2}$ und $\frac{r^3}{l^3}$ vernachlässigt werden dürfen. Das Resultat wird wohl in dem Satze ausgesprochen: der cubische Ausdehnungscoefficient ist gleich dem dreifachen linearen. Von linearen Ausdehnungscoefficenten stellen wir die wichtigsten in folgender Tabelle zusammen:

Glas und Platina	0,0008
Stahl	0,0012
Gold	0,0014
Kupfer	0,0017
Silber	0,0019
Blei	0,0028
Zink	0,0029
Alkohol (Weingeist)	0,111
Schwefeläther	0,071
Salzsäure	0,037
Quecksilber	0,018

Die lineare Ausdehnungscoefficient der beständigen Luftarten ist 0,365.

9. Ausdehnung und Wärme, Zusammenziehung (Verdichtung) und Erkaltung sind wenn nicht identische, doch sich ergänzende Erscheinungen und Thatsachen. Das ist hier näher zu entwickeln. Man unterscheidet feste, flüssige und luftförmige Körper. Feste Körper sind diejenigen, deren kleinste Theile, Moleküle, einen solchen Zusammenhang haben, daß nur eine mehr oder minder große Kraft sie zu trennen vermag; flüssig ist der Körper, wenn die gringste Einwirkung den Zusammenhang der Moleküle aufhebt, und luftförmig endlich, wenn die Theilchen das Bestreben haben, sich von einander zu entfernen. Flüssige Körper müssen deshalb in Gefäßen aufbewahrt werden, sie nehmen die Form dieser Gefäße an, und die Kugelform, wenn sie frei für sich im Raume bestehen. Die Himmelskörper ebenso wie unsere Erde, die zu ihnen gehört, waren ehedem feurig-flüssig und sind deshalb sphäroidisch geworden; Regentropfen und Hagelkörner

beweisen dasselbe. Luftförmige Körper haben die beiden ersten Folgerungen mit den flüssigen Körpern gemein, sie verbreiten sich aber allseitig im Raum, ohne eine bestimmte Gestalt anzunehmen.

Innerhalb des Festen unterscheidet man noch harte, weiche, spröde und zähe Körper. Hart ist der Körper, dessen kleinste Theilchen sich weder leicht trennen noch leicht verschieben lassen, das Gegentheil des Harten ist das Weiche; zähe Körper gestatten eine leichte Verschiebung aber eine schwere Trennung der Moleküle, während diese bei spröden leicht getrennt aber schwer verschoben werden können. Kiesel ist hart, Schmalz weich, Gummi zähe, Glas spröde. Man prüft die Festigkeit der Körper durch Zerreißen, Zerbrechen, Zerdrücken und Zerdrehen oder vielmehr durch den Widerstand, der durch die Beschaffenheit des Körpers diesen vier Einwirkungen entgegengesetzt wird. Beim Zerreißen aber sucht man zwei Punkte des Körpers von einander zu entfernen, beim Zerbrechen sucht man zwei Punkte des Körpers einander zu nähern, beim Zerdrücken nähert man alle Punkte einander und beim Zerdrehen werden zwei Punkte um eine Axe drehend nach entgegengesetzten Seiten bewegt.

Die flüssigen Körper zeigen gegen andere ein verschiedenes Verhalten; sie sind netzend oder nicht netzend, je nachdem ein Tropfen von ihnen auf einem festen Körper zerfließt oder nicht. Wasser netzt das Holz, nicht aber Quecksilber. Flüssige Körper zerfließen bald in einander, bald nicht; Wasser und Alkohol zeigen das erstere, Wasser und Oel das zweite. Flüssige Körper nehmen endlich luftförmige Körper in sich auf, absorbiren dieselben. Das Wasser der Meere und Flüsse enthält atmosphärische Luft, denn sonst könnte das Thierleben nicht in ihnen erhalten werden. Luftförmige Körper legen sich gern an feste Körper an, verdichten sich auf ihnen, wie man zu sagen pflegt, deshalb sind wohl- oder übelriechende Stoffe eher an den Wänden als im Innern eines Zimmers wahrnehmbar. Luftförmige Körper dringen, wie schon angegeben in flüssige hinein, und durchdringen endlich andere luftförmige Körper ohne Ordnung des Leichtern über den Schwerern, wie es doch bei in einander nicht zer-

fließenden Flüssigkeiten der Fall ist. Die Diffusion der Gase, wie man das Verhalten zweier verschiedenen Luftarten genannt hat, ist die eine der Ursachen des Aufsteigens von Wasserdampf und Kohlensäure in die atmosphärische Luft, aber auch die Anwesenheit jener luftförmigen Stoffe an allen Punkten dieser.

Innerhalb der luftförmigen Körper unterscheidet man Dämpfe und Gase; erstere sind durch Wärme in Luftform übergegangene Flüssigkeiten, und werden durch Entziehung der Wärme wieder in diese zurückgeführt. Das gilt nicht von den Gasen; diese aber können durch Druck flüssig gemacht werden, wie das Ammoniakgas, welches bei einem Drucke von sieben Atmosphären (7. 760^{mm} Quecksilberdruck) wieder flüssig wird, oder aber sie werden niemals flüssig und heißen dann permanente Gase; als solche sind Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff allgemein bekannt.

Anmerkung. Sauerstoff ist ein Gas, welches man leicht aus chlorsaurem Kali, einem in jeder Apotheke käuflichen Stoffe von salzähnlichem Aussehen erhält. Man erhitzt dasselbe in einem Glaskolben, welcher in eine Röhre ausläuft; durch diese entweicht das Gas, das nun unter Wasser aufgefangen wird. Der Sauerstoff unterhält und befördert das Verbrennen, oder vielmehr ein brennbarer Körper verbindet sich unter Luft- und Wärmeentwicklung mit dem Sauerstoffe. Verbindet sich Kohle mit Sauerstoff in dem gewöhnlichen Verbrennungsprocesse, so entsteht eine ebenfalls farblose, und somit unsichtbare Luftart, die Kohlensäure, die von den Pflanzen vermittelst ihrer Blattorgane aufgesogen und innerhalb derselben durch Einwirkung des Sonnenlichtes wieder in Kohle und Sauerstoff zerlegt wird. Die Kohle verbleibt den Pflanzen — Holzstoff —, der Sauerstoff wird in die atmosphärische Luft zurück geathmet, um mit dieser von den thierischen Körpern durch Lungen oder Kiemen oder Luftlöcher aufgenommen zu werden, und innerhalb derselben sich mit dem durch die Nahrung vermittelten Kohlen-(Fett-)Stoffe zu verbinden, aus welchem Verbrennungsprocesse dann abermals Kohlensäure entsteht, die ausgeathmet nun wiederum die Hauptpflanzennahrung abgibt. Das ist in großen Zügen der bekannte Kreislauf des Thier- und Pflanzenlebens. Von der Kohlensäure kann nur noch angeführt werden, daß sie sich verdichten, ja flüssig machen läßt. — Die atmosphärische Luft ist Sauerstoff und Stickstoff in einem Gemenge von vier Maßen Stickstoff und einem Maße Sauerstoff, ein Gemenge, und keine chemische Verbindung, weil die Eigenschaften beider Stoffe nach ihrer Vereinigung jederzeit kenntlich und unterschieden hervortreten, und bei der Absorption der atmosphärischen Luft durch Wasser sogar mehr Sauerstoff in das-

selbe hineindringt, als es das ursprüngliche Verhältniß der Luftbestandtheile gestatten dürfte. Wenn man in Wasser ein Stück Zink legt und Schwefelsäure hinzugießt, so entsteigt der Flasche durch ein Entbindungsrohr eine unsichtbare Gasart, der Wasserstoff. Derselbe verbrennt mit schwacher bläulicher Flamme und seine Verbindung mit dem Sauerstoff, das ist hier der Verbrennungsproceß, liefert den Wasserdampf, der sich an den kalten Glaswänden eines über die Flamme gehaltenen gläsernen Cylinders in Wassertropfenform niederschlägt. Stickstoff und Wasserstoff verbinden sich zu Ammoniakgas, das allen verwesenden thierischen Stoffen entsteigt und sich äußerlich durch einen sehr starken und prickelnden Geruch offenbart. Alle diese Gasarten entziehen sich der Gesichtswahrnehmung durch ihre Farblosigkeit und Durchsichtigkeit, aber auch durch ihre geringe Schwere, denn ungefähr wiegen 800 Maß Luft so viel als 1 Maß Wasser. — Der mehrfach genannte Weingeist ist ein Produkt der Zuckergährung, der als solcher viel Wasser enthält, das man durch Ueberführung in die Dampfform und Zurückführung in den flüssigen Zustand — Destillation — von Wasser allmälig und schließlich durch Behandlung mit Kalk ganz befreit: in diesem reinem Zustande heißt der Weingeist abolut oder Alkohol.

10. Fest, flüssig, luftförmig sind also die drei Eigenschaften, durch welche man den Aggregatzustand der Körper bezeichnet, d. h. den Zustand, welchem gemäß die einzelnen Theilchen eines Körpers zu einem Ganzen angesammelt sind. Der Aggregatzustand der Körper ist aber nicht unveränderlich; die Wärme wandelt ihn um, sie macht die flüssigen Körper luftförmig, die festen flüssig, wenn sie vermehrt wird; Verminderung der Wärme gibt umgekehrt feste und flüssige Körper aus flüssigen und luftförmigen. Eis und Schnee werden Wasser und dieses wird Wasserdampf, wenn das Thermometer 0^0 oder 100^0 zeigt. Wasserdampf schlägt sich an kalten Gefäßwänden zu Wassertropfen nieder, und Nebel werden in kalten Herbst- oder Frühjahrsnächten Reif oder Eis. Nicht alle Körper nehmen indeß wie das Wasser alle drei Aggregatzustände an; ihm gleichen hierin vorzugsweise Schwefel, Zink, Wachs und die Fette. Die meisten festen Körper sind nur noch in die flüssige Daseinsform zu wandeln, wie die Metalle Eisen, Silber, Gold, Kupfer u. s. w. andre feste Körper wie die Kohle kommen nur in diesem festen Zustande vor. Beispielsweise verdient noch der Weingeist genannt zu werden, der nicht gefriert und die Kohlensäure, die wir selbst im festen Zustande kennen.

Die Aenderung vom festen Zustande in den flüssigen heißt Schmelzen, die vom flüssigen in den luftförmigen Verdampfen, vom festen sofort in den luftförmigen Verdunsten. Wird der luftförmige Zustand in den flüssigen übergeführt, so wird destillirt, ein Uebergang vom flüssigen in den festen oder vom luftförmigen Zustand in den festen heißt Gefrieren und Sublimiren. Eis schmilzt bei 0°, Eis verdunstet bei jeglicher Temperatur, auch bei den größten Kältegraden. Wasser verdampft bei 100°. Regen ist destillirter Wasserdampf, Eis ist gefrorenes Wasser, Schnee sublimirter Wasserdampf. Der Ausdruck Verdunsten wird auch dann gebraucht, wenn der flüssige Zustand in den luftförmigen übergeht, da auch hier die Temperatur für den Akt selbst gleichgültig ist.

Es kann hier die Frage nach der Natur der Dunstbläschen in der Atmosphäre nicht übergangen werden. Halley und Leibnitz halten sie für Wasserbläschen, deren Inneres mit Luft angefüllt sei, und das ist auch heute noch die vulgäre Ansicht, wenn auch theilweise die volle Wassersolidität der Dunstkügelchen nicht in Abrede gestellt wird. Neuerdings hat Kober folgende 4 Sätze aufgestellt: 1. Die Wasserdünste der Atmosphäre bestehen sämmtlich aus größern oder kleinern Tropfen von solider Wassernatur. 2. Die innerhalb der Atmosphäre schwebenden Wassertröpfchen überziehen sich mit einer mehr oder minder feinen Luftschicht, die das rasche Zusammenlaufen der einzelnen kleinen Tröpfchen zu größern Tropfen verhindert. 3. Solche gasumhüllte Tröpfchen bilden häufig zusammenhängende Conglomerate oder Complexe. 4. Dem Fallen der Dunstkörperchen sind nicht blos aufsteigende Luftströmungen hinderlich, sondern auch Adhäsionsverhältnisse. Der Regen entsteht durch die Vereinigung bisher getrennter Dunstkörperchen. Oft will aus schweren Wolken kein Regen kommen; sind aber erst einige Tropfen gefallen, so folgt der Regen reichlicher; ähnlich wie beim Löthen die Fettkügelchen plötzlich zusammenschießen, ebenso ergreift der einmal entstandene Regen rasch die ganze Wolke. Hiermit steht ein direkter Versuch von Plateau in Verbindung. Man kann bekanntlich ein mit Wasser gefülltes Glas umkehren, ohne daß

Wasser herausfließt. Bringt man nun an die unten liegende Wasserfläche ein mit Wasser umhülltes Luftbläschen, so adhäriren die Wände an der Wasserfläche, zerreißen und lassen die eingeschlossene Luft aufsteigen. Wurde aber dem Wasser ein Fläschchen mit kochendem Wasser, das also Dunstbläschen entwickelte, untergestellt, so erfolgt dies Aufsteigen von Luft nicht. Hieraus schließt der genannte Physiker, daß die Dunstbläschen keine Luft enthalten. Allein der Versuch ist nicht entscheidend, weil in den beiden Akten desselben die Umstände nicht gleich sind; die dem Kochfläschchen entsteigenden Dunstkörperchen erregen immer eine Strömung, einen Luftzug, der die in den Bläschen enthaltene Luft fortführen könnte, ehe sie Zeit zum Aufsteigen gewinnt. Sicher ist indeß, daß Dunstkörperchen aus Wassertheilen allein existiren, da das Gewicht des dunstförmig gewordenen Wassers leichter ist als die atmosphärische Luft, und die Gewichtsdifferenz für mit Wassergas umhüllte Luftbläschen zu groß ist.

11. Anknüpfend an die Bestimmung der Fundamentalpunkte beim Thermometer, kann jetzt zu den Naturerscheinungen übergegangen werden, die dem Gesetze unterworfen sind, daß, wenn ein fester Körper flüssig wird durch Zuführung von Wärme, diese so lange für das Gefühl und das Thermometer verloren geht (latent wird), als noch ein Stück des festen Körpers in der schmelzenden Masse vorhanden. Gleiches geschieht beim Uebergange vom flüssigen zum luftförmigen Zustande, auch dabei wird Wärme gebunden. Umgekehrt, wird ein luftförmiger Körper flüssig oder ein flüssiger fest, so wird Wärme frei, für das Gefühl und das Thermometer empfindlich. Einige Thatsachen mögen das Gesetz erläutern. Jedermann kennt die Schwüle, welche einem Gewitter vorhergeht. Dieselbe erklärt sich aus dem raschen Uebergange des in der Atmosphäre enthaltenen luftförmigen Wasserdampfes in den tropfbar flüssigen Zustand, was augenblicklich aus der eigenthümlichen und überaus raschen Wolkenbildung erkannt wird. — Wenn man gebranntem Kalke, d. h. wasserfreier Kalkerde ein wenig Wasser zusetzt, so bildet sich Kalkerdehydrat, d. h. das zugesetzte Wasser geht in den festen Körper als fester Körper ein, es muß daher eine gewisse Wärmemenge frei wer-

den, und dieselbe ist wenigstens so groß, daß sich Schwefelfäden entzünden lassen. Das Festwerden des Wassers sieht man nicht unmittelbar, aber es läßt sich aus der weiteren Verwendung des Kalkerdehydrates schließen; dasselbe wird nämlich mit mehr Wasser überschüttet, suspendirt sich in demselben, wird brei- und milchartig, verliert auch natürlich die früher so erhöhte Temperatur — der Kalk wird gelöscht. — Das Transpiriren des menschlichen Körpers bewirkt eine Herabstimmung der hohen Temperatur des Blutes; daher bricht ein gesunder Schweiß die Fieberhitze, daher muß man bei angestrengter körperlicher Arbeit, z. B. beim raschen Marschiren, womöglich warme Getränke, heißen Kaffe oder heiße Bouillon genießen, um ein heftiges Schwitzen anzuregen; der kräftig hervortretende Schweiß verdunstet auf der Hautoberfläche, und die damit entstehende Verdunstungskälte stärkt die Kräfte und beseitigt die nach dem Gehirn hindrängenden Blutwallungen. Warmes Waschwasser bewirkt ein stärkeres Frösteln als kaltes. In warmen Ländern bereitet man Eis, wenn man Wasser in sehr flachen Schalen der raschen Verdunstung unterwirft. Getränke werden daselbst kühl erhalten, wenn man sie in porösen Schläuchen aufbewahrt, Lederschläuchen etwa oder porösen Thoncylindern. Die durch die Poren sickernde Flüssigkeit verdunstet auf der Oberfläche auf Kosten der Wärme innerhalb der Flüssigkeit in den Gefäßen. Die angenehme Wirkung eines Glases Zuckerwasser während der Sommerschwüle beruhet nicht so sehr auf der Süßigkeit des Getränkes, als auf der bewirkten Abkühlung des Wassers, in dem der feste Zucker flüssig geworden ist. In unsern nördlichen Ländern bereiten wir zu jeder Jahreszeit Eisgelées dadurch, daß die umzuwandelnden Stoffe in eine Blechbüchse gefaßt, und diese nun in einer Mischung von schmelzendem Schnee oder Eis, dem Kochsalz beigemengt worden, rasch herumgedreht wird. Eis und Salz werden flüssig auf Kosten der Blechbüchse und ihres Inhalts, der nun rasch gefriert. Auf ähnliche Weise hat Fahrenheit seinen künstlichen Gefrierpunkt hergestellt, indem er Eis, Salmiak und Kochsalz zu einer künstlichen Kältemischung zusammenstellte. Ein indirekter Beweis für die Allgemeinheit des angezogenen Naturge-

gesetzes liegt noch darin, daß eine Flüssigkeit desto mehr von einem festen Körper auflösen kann, je wärmer sie ist. Nach früheren Ermittlungen sollte das Kochsalz von dieser Thatsache eine Ausnahme machen; genauere Beobachtungen haben jedoch festgestellt, daß heißes Wasser auch mehr Kochsalz auflösen kann als kaltes, und wenn der Unterschied in beiden Fällen nur ein geringer ist, so folgt nur, daß das Kochsalz erst bei sehr hohen Graden der Wärme flüssig wird.

12. Es entsteht nun sofort die Frage, ob die Quantität Wärme, die beim Uebergange aus dem flüssigen Zustande in den festen etwa gebunden wird, gleich ist der Wärmemenge, die beim umgekehrten Vorgange dem Thermometer sich bemerklich macht. Ein bekannter Versuch löst das Problem. Wenn man ein Kilogramm Eis von 0° mit einem Kilogramm Wasser von 79° mischt, so erhält man zwei Kilogramm Wasser von 0°, alle Wärme wurde verbraucht, um das feste Eis flüssig zu machen. Wenn man aber Wasser an einem kalten Tage und an einem ruhigen Orte bis auf (— 10)° erkalten läßt, so bleibt es flüssig, gefriert aber sofort, so bald man durch die Thermometerkugel, die man in dasselbe hineintaucht, eine Bewegung der Wassertheilchen veranlaßt, es gefriert aber nicht die ganze Masse, sondern etwa nur der achte Theil davon. Die freiwerdende Wärme dieses achten Theiles erhöht die Temperatur der sieben andern Theile so sehr, daß sie nicht mehr gefrieren.

Noch mehr! Das Flüssigwerden aus dem festen Zustande, das Verdampfen, ist Ausdehnung des Körpervolumens, das Tropfbarwerden, das Gefrieren, sind mit der Volumenverminderung analoge Vorgänge. Wenn also luftförmige Körper zusammengedrückt werden oder sich verdichten, so muß Wärme frei werden. Das geschieht 1. im pneumatischen Feuerzeuge. Ein fester Cylinder von Glas oder Messing hat einen sich luftdicht auf- und abbewegenden Kolben, an dessen unterer Bodenfläche sich ein Häkchen mit etwas Zunder befindet. Durch rasches Niederdrücken des Kolbens wird die Luft im Cylinder stark zusammen gedrückt und da der Zunder sich entzündet, so kann das nur durch die frei gewordene Wärme geschehen sein. Es geschieht 2. im Dö-

bereinerschen Feuerzeuge. In demselben wird vermittelst Zink- und Schwefelsäure aus Wasser Wasserstoff entbunden und auf ein Stück poröses Platina geleitet. Daselbst verdichtet sich das Gas so sehr, daß es sich entzündet. Gleiches ist z. der Fall mit auf chemischem Wege ganz fein vertheiltem Eisen, welches durch Hineinstreuen in die atmosphärische Luft glühend wird, oder mit fein pulverisirter Kohle, wie sie sich in Pulverfabriken vorfindet und nicht selten durch Selbstentzündung gefährliche Explosionen verursacht — Pyrophore. —

Daß Herabminderung der Temperatur und Zusammenziehung, Erhöhung der Temperatur und Ausdehnung nur verschiedene Ausdrücke für denselben Vorgang sind, wird endlich durch die Thatsachen bewiesen, nach welchen Eisen durch Zusammendrücken auf $\frac{1}{18}$ des ursprünglichen Volumens und Silber gar bei $\frac{1}{12}$ Volumenveränderung sich bis auf 100° erwärmen, oder nach welchen verdichtete und abgekühlte Luft beim Herausströmen aus Gefäßen Wassertropfen gefrieren macht.

Der oben statuirte Unterschied zwischen permanenten und nicht permanenten Gasen ist also theoretisch nicht haltbar, und Beobachtung und Rechnung berechtigen zu der Annahme, daß unsere Luftarten in den flüssigen Zustand übergehen würden, wenn wir eine Temperaturerniedrigung von (— 273)° ermöglichen könnten. Auf der andern Seite ist die Kohle bekanntlich im Diamant krystallinisch geformt. Krystalle erhält man aber nur aus aufgelösten oder geschmolzenen Massen, und somit hat es auf der Erde Temperaturverhältnisse gegeben, wo auch die der Ausdehnung sich am meisten widersetzende Kohle im flüssigen Zustande vorhanden war. Daß endlich Gase durch Druck flüssig werden, zeigt man am leichtesten an einer winkelförmig gebogenen luftleeren und an beiden Enden geschlossenen Röhre, in derem einen Ende etwas Schwefeläther sich befindet. Dieser wird schon durch die Wärme der Hand zum Verdampfen gebracht und zeigt sich bald am andern Ende wieder in flüssigem Zustande, weil die Masse des Gases nicht nur auf die Gefäßwände, sondern

auch auf die einzelnen Massentheilchen einen Druck ausübt, der dieselbe in den flüssigen Zustand zurück versetzt.

13. Wärme scheint ein innerer Zustand oder Vorgang zu sein, Ausdehnung und Zusammendrückung sind äußerlich wahrnehmbare und durch Werkzeuge hervorzurufende Erscheinungen. Beiderlei Thatsachen stehen aber im innigsten Zusammenhange mit einander; welches ist nun die Brücke, welche beide mit einander verbindet? Wärme wird nicht allein durch Verbrennung oder andere chemische Processe, nicht allein durch Einwirkung der Sonne hervorgerufen, Wärme entsteht auch durch Reiben, Stoßen, Schlagen, überhaupt durch Vorgänge jeder Art, durch welche die Theilchen eines Körpers einander genähert werden. Nicht allein wenn Gase sich verdichten, selbst dann, wenn Flüssigkeiten von festen Körpern absorbirt werden, steigt nach Pouillets' Versuchen das Thermometer in günstigen Fällen 3—4 Minuten bis zu 10°, wobei noch zu bemerken, daß der Vorgang von der Natur des pulverisirten festen Körpers und der der zu absorbirenden Flüssigkeit unabhängig war. Wärme entsteht auch durch gehinderte Bewegung. Hammerschläge auf den Amboß erhitzen den letzteren, Bohrer, Meißel und ähnliche Instrumente erhitzen sich durch den Widerstand des zu bearbeitenden Materials. Das Reiben der Hände macht warm; zwei Holzstücke entzünden sich durch Reibung. Wärme ist also vor allen Dingen nicht stofflich, denn sonst würde sie verbraucht werden, also zu sein aufhören. Wärme ist gehinderte Bewegung in allen Fällen und gleichartig der durch Bewegung hervorgerufenen Arbeit. Beim Flüssigwerden, beim Verdampfen gehen die kleinsten Körpertheilchen auseinander, die verbrauchte Wärme erscheint als innere Arbeit. Beim Gefrieren gehen die kleinsten Theilchen zu einander hin, die innere Arbeit tritt äußerlich als wirksame Wärme hervor. Man denke sich folgenden Kreislauf. Ein großes Rad mit einer excentrischen Scheibe (Spinnradvorrichtung) wird durch die Druckkraft von siedenden Dämpfen um eine Axe bewegt, deren Reibung erzeugt Wärme, welche wiederum benutzt wird, das Wasser zum Sieden zu bringen, um die bewegenden Dämpfe zu erhalten. Eine solche calorische Maschine ist also ein wahres perpetuum mobile, des-

sen Aufsuchen so manchen Menschen um den Verstand gebracht. Die Sache ist in der That nicht so einfach, wie sie geschildert worden, aber das perpetuum mobile braucht nicht erst gefunden zu werden, es ist längst da im Weltganzen und das Gesetz dieses Weltganzen heißt „Erhaltung der Kraft“.

Ehedem dachte man sich die Körper aus Atomen bestehend, denen eine anziehende Kraft innewohne, und die von einer Wärmeatmosphäre umgeben seien. Diese Vorstellung hat man heutzutage corrigiren müssen und zwar nach Seite der Wärmeatmosphäre hin. Man gibt den Atomen jetzt Anziehung und Bewegung; die Anziehungen streben Bewegungen hervorzurufen, werden aber durch einen Widerstand daran verhindert. Daher spricht man von Quantität der Spannkraft oder potentieller Energie. Die Bewegungen der Massentheilchen geben die Quantität der lebendigen Kraft oder die dynamische Energie. Die Summe beider ist im Weltganzen constant, nur Stoffwechsel und Uebergang des Kräftevorraths von der einen in die andere Form bedingen allen Wechsel der Erscheinungen.

Setzt man die Wärmemenge, welche erforderlich ist, um eine Gewichtseinheit Wasser um 1^0 von 0^0 ab zu erhöhen gleich 1, so findet man dieselbe für Luft $= 0,2377$. Ein Kubikmeter Luft wiegt 1,293 Kilg. Wird dieselbe in einen Würfel mit verschiebbarer Wand eingeschlossen, und nach und nach erwärmt auf 273^0 jedoch so, daß das Volumen des Würfels erhalten bleibt, weil die verschiebbare Wand belastet wird, ein andermal aber so, daß sich durch Ausdehnung der erwärmten Luft die verschiebbare Wand um 1^m Länge hebt, dann wird im letztern Falle mehr Brennmaterial verbraucht als im erstern, und zwar im Verhältniß von $1,41 : 1$. Die Wärmeeinheiten sind $273 \,.\, 1,293 \,.\, 0,2377 = 83$ und $83 \,.\, \frac{1}{1,41} = 59$. Die Differenz von 24 Wärmeeinheiten entspricht also der Arbeitsleistung durch welche ein Atmosphärendruck über einen Quadratmeter $= 10328$ Kilg. um 1 Meter fortgeschoben werden kann. 24 Wärmeeinheiten sind demnach äquivalent 10328 Kilogrammeter oder 1 Wärmeeinheit entspricht

$\frac{10328}{24} = 430$ ungefähr — genauere Rechnungen ergeben nur 424 — Kilogrammeter.

14. Die Ansicht, daß Wärme aus Bewegung hervorgehe, ist eine verhältnißmäßig leichte und daher schon in früher Zeit gewonnene.* Als bloße Ansicht ist sie indeß unfruchtbar, sie muß erst in Zahlengrößen festgestellt und in Rechnung gebracht werden können, wie soeben gezeigt worden. Diese Erweiterung der physikalischen Naturanschauung hat zuerst der jetzt in Heilbronn lebende Stadtarzt J. R. Mayer, der früher als holländischer Schiffsarzt eine Reise nach Java gemacht, von kleinen Anfängen aus vollbracht. Er bemerkte auf Java nämlich bei den fieberkranken Europäern eine große Röthe des venösen Blutes, und indem er nun bedachte, daß die verschiedene Färbung in den Gefäßen des großen und kleinen Blutumlaufs von einer mit den Säften vorgenommenen Oxydation herrühre, mit welcher eine erhöhte Temperatur verbunden, daß aber andererseits die Blutwärme des menschlichen Körpers nahezu unveränderlich sei, wurde er zu dem Schlusse geführt, daß in wärmeren Gegenden die Abgabe der Körperwärme an die äußere Umgebung geringer sein müsse als in kalten, daß mithin das venöse Blut eines unter den Tropen lebenden Menschen höher geröthet sein müsse, als in höheren Breiten der Erde. Die Verfolgung dieses Gedankens führte ihn zur Aufstellung seines Princips, dessen mathematischer Ausdruck das mechanische Aequavilent der Wärme ist. Die Entwicklung der Theorie datirt von 1842 und an ihr haben sich Joule in Manchester, Colding in Kopenhagen, Helmholtz jetzt in Berlin, Redtenbacher in Carlsruhe und Clausius jetzt in Bonn fast gleichmäßig und mit Erfolg betheiligt. Von Helmholtz rührt die Benennung des Princips „Erhaltung der Kraft" her. Redtenbacher schließt sich unter dem Begriffe des Dynamidensystems an die ältere Anschauung näher an als die andern Forscher. Nach ihm bestehen die Körper aus Atomen, die von Aetherhüllen um-

---

* Die Darstellung des Endes vom vorigen und dieses Paragraphen ist zum Theil nach der Programm-Abhandlung des Gymnasial-Oberlehrer Gelshorn (Aurich 1871) entworfen.

geben sind, letztere üben Abstoßungen aus, werden aber von den Atomen selbst angezogen und schwingen in Folge davon um die Atome herum. Von der Stärke dieser oscillatorischen Bewegungen hängen Temperatur und Gefüge der Körper ab.

Nach Clausius ist die Wärme eine Folge der gehinderten Bewegung der Atome selbst. Die Bewegung der Atome ist nämlich fortschreitend oder drehend oder hin und herschwingend, letzteres namentlich bei zusammengesetzten Molekülen, da die einfachen Bewegungen der Atome durch die Zusammenlegung derselben in oscillatorische Bewegungen umgesetzt werden mußte. Jede Zufuhr von Wärme treibt also die Atome auseinander und verstärkt nebenbei ihre schwingende Bewegung: die erste Wirkung gibt den Begriff der Ausdehnung und der verlornen (latenten) Wärme, die zweite Wirkung die freie dem Gefühl und Thermometer sich offenbarende Wärme.

Im gasförmigen Zustande hält Clausius die Cohäsion für vollständig überwunden, so daß die Atome nach allen Richtungen gradlinig durch den Raum fliegen „einem Mückenschwarm vergleichbar". Diese Bewegung erfolgt mit um so größerer Geschwindigkeit, je größer die Wärmezufuhr ist, die den Atomen zu Theil wird; mit Verminderung derselben vermindert sich auch die Geschwindigkeit der Atome. Hierher schreibt sich die Ausdehnsamkeit oder Spannkraft der Gase, die bei jeder Temperaturverminderung von 1^0 um $\frac{1}{273}$ abnimmt, so daß sie bei $(-273)^0$ gar nicht mehr vorhanden und $(-273)^0$ also der absolute Nullpunkt der Temperatur sein würde. Im flüssigen Zustande sind die Atome und Moleküle absolut gegen einander verschiebbar, die anziehenden Kräfte und die abstoßend fortbewegenden erhalten sich im Gleichgewicht, während sogar bei den festen Körpern die Anziehung überwiegt, dennoch aber den Atomen eine Bewegung, die hier also nur noch als eine hin- und herschwingende, als eine pendelartige vorgestellt werden kann, gelassen werden muß.

Anknüpfend an den Urzustand unseres Planeten so wie des ganzen Sonnensystems haben wir dieses uns in Uebereinstimmung mit Kant und La Place als eine gewaltige Nebelmasse zu den-

ken, der wir allgemeine atomistische Anziehungskraft und Gesammt-Rotationsbewegung zuerkennen — physisch kommen wir über diese Substrate unseres Denkens nicht hinaus. Es fand nun eine Umwandlung der Spannkraft dieser Nebelmasse in Folge ihrer Zusammenballung in die lebendige Kraft der Massenbewegnng statt, so daß bei hinreichender Verdichtung die zitternde Bewegung der kleinsten Theilchen bestehen blieb. Die Nebelmasse erfassen viele als den Aether, der von den Physikern als der Träger der Bewegung nicht entbehrt werden kann. Aether ist ihnen daher der Urzustand der Materie, aus der jeder Stoff durch eine besondere Art der Verdichtung hervorgegangen ist. Der Aether ist somit ein wahrhaft Körperliches und Schweres, nicht also ein neues Imponderabile, welches an die Stelle anderer aus dem Denken verbannter Imponderabilien getreten ist. Der Aether ist das den Weltraum Erfüllende.

15. Es bleibt noch übrig, einige Zahlenwerthe für wichtige Wärmevorgänge mitzutheilen. Wenn schon oben angeführt wurde, daß 1 Gr. Eis von 0° und 1 Gr. Wasser von 79° 2 Gr. Wasser von 0° geben, so ist offenbar, daß 79 der Zahlenwerth der latenten Wärme ist, die man auch aus naheliegenden Gründen Flüssigkeitswärme genannt hat. Nach Irvine's Bestimmungen gelten für Schwefel, Blei, Wachs, Zink, Zinn, Wismuth die resp. Zahlen 80, 90, 97, 274, 278 und 309 d. h. also beispielsweise, ein Gewichtstheil Zink wird flüssig durch Zuführung einer Wärmemasse, welche im Stande ist, dieselbe Gewichtseinheit Wasser von 0° auf 274° zu erhöhen. In gleicher Weise entstehen aus 1 Gr. Wasserdampf von 100° und 5,4 Gr. Wasser von 0° 6,4 Gr. Wasser von 100°. Anders ausgedrückt: 5,4 Gr. Wasser gebrauchen zur Temperatur-Erhöhung von 0° bis 100° 540 Wärme-Einheiten und diese sind erforderlich um 1 Gr. Wasser in Dampf zu verwandeln.

Die Schmelzpunkte der Körper liegen weit auseinander. Die wichtigsten Zahlen sind:

Phosphor	43°	Zinn	230°	Silber	1000°
Wachs	61°	Blei	324°	Kupfer	1100°
Schwefel	109°	Zink	423°	Gußeisen	1200°

Gold	1250°	Gehämmertes		Platin	1700°
Stahl	1400°	Eisen	1600°		

Thon und Kohle sind unschmelzbar.

Eis schmilzt bei 0° und die feste Kohlensäure bei (—87)°.

Viele Körper erhalten vor dem Flüssigwerden einen Mittelzustand wie der Schwefel, der erst zähe, dann weich und endlich flüssig wird; andere schmelzen zugleich in der ganzen Masse und noch andere werden erst an der Oberfläche weich. Metalllegirungen sind zwei durch Schmelzen mit einander vereinigte Metalle, deren eines nicht Quecksilber ist — dieses bildet mit andern Metallen die sogenannten Amalgame. Der Schmelzpunkt einer Legirung liegt gewöhnlich tiefer als der Mittelwerth der Schmelzpunkte der einzelnen Metalle selbst. So schmilzt z. B. das Rose'sche Metallgemisch, das aus zwei Theilen Wismuth, einem Theile Zinn und einem Theile Blei besteht, schon im kochenden Wasser. Die Thatsache scheint darin gegründet zu sein, daß die durch Zusammenschmelzung hergestellte Molekular-Gruppirung eine nur äußerlich scheinbar gleichartige Masse gegeben hat, die bei geringer Wärmezufuhr sofort wieder auseinander geht. Dennoch ist die Cohäsion der festen Masse im Messing größer als in dessen Bestandtheilen, im Kupfer oder im Zink; ähnlich verhalten sich Kanonen- und Glockengut, die aus Kupfer, Zink und Zinn resp. aus Kupfer, Zink, Zinn und Nickel bestehen. Der Schmelzpunkt ist übrigens nicht vom Luftdrucke unabhängig, wie das schon aus einer theoretischen Betrachtung hervorgeht ähnlich der, welche gleich unten beim Kochen gemacht werden wird. Ist nämlich ein Körper im flüssigen Zustande von größerm Volumen, so muß der Schmelzpunkt erhöht werden, umgekehrt findet eine Erniedrigung desselben statt. Flüssiges Wasser hat ein geringeres Volumen als festes, deshalb sinkt sein Schmelzpunkt bei zunehmendem Drucke, und wie Clausius und Thomson angeben bei einem Drucke von 120,8 Atmosphären um 1°.

Schon oben ist des Vorganges der Krystallisation gedacht. Wenn geschmolzene Massen erkalten, so gruppiren sich die einzelnen Moleküle im Falle des Gewährenlassens zu eigenartigen für jeden Stoff verschiedenen Gestalten, die von regelmäßigen unter

unveränderlichen Winkeln zu einander geneigten Flächen begrenzt werden. Man sagt, die Massentheilchen ziehen nicht nur einander an, sondern diese Anziehungen werden auch nach verschiedenen Seiten bald leichter bald schwieriger bewirkt. Das kann nur aus der eigenthümlichen schwingenden Bewegung hergeleitet werden, welche die mechanische Wärmetheorie den Körperatomen zulegen muß, und die bei Herabminderung des Wärmezustandes, beim Erkalten also ungehindert zur Erscheinung kommt. Krystallbildungen erfolgen auch bei Auflösungen von festen Körpern in Flüssigkeiten, sobald die auflösende Flüssigkeit verdunstet; so bei Kochsalz, Alaun, Vitriol von Eisen oder Kupfer, bei Schwefel u. s. w. Dabei ist zu bemerken, daß beim Schwefel der aus der Auflösung gewonnene feste Schwefel eine andere Gestalt annimmt, als der aus den geschmolzenen hervorgegangene. Bei Salzlösungen kann aus ähnlichen Gründen auch nur das reine Wasser gefrieren und zwar bei niedrigern Temperaturen als dieses für sich allein. Darum gewinnt man in kältern Gegenden gesättigtere Salzsoolen aus dem Meerwasser, sobald man dasselbe gefrieren läßt.

16. Flüssige Körper können gefrieren oder verdampfen. Ersteres geschieht, wie soeben auseinandergesetzt, bei einer bestimmten Temperatur, Letzteres bei jeder beliebigen, dann aber nur von der Oberfläche der Flüssigkeit aus. Hat der durch die Verdampfung entstehende Dampf jedoch die Kraft, den auf der Flüssigkeits-Oberfläche ruhenden Luftdruck zu überwinden, so kann die Verdampfung von allen Punkten der Flüssigkeit, auch von den innern, ausgehen; dieselbe geht dann über in eine wallende Bewegung, sie kocht oder siedet. Auch das Sieden muß bei einer bestimmten Temperatur eintreten, bei der grade die ausdehnende Wirksamkeit des sich bildenden Dampfes den jeweiligen Luftdruck zu überwinden vermag. Bei einer Barometerhöhe von 760 ^{mm} siedet:

Absoluter Alkohol bei	79 °	Quecksilber bei	350 °
Wasser bei	100 °	Zink* bei	1040 °
Leinöl bei	316 °	Kohlensäure bei	(— 85 °)

* Auf dieser Eigenschaft des Zinkes, leicht zu verdampfen, beruht die

Kochsalzlösungen, die 1,204 mal so schwer sind als Wasser sieden erst bei 109°.

Die Verdunstung steigert sich mit der Größe der verdunstenden Fläche und am meisten mit der Fortschaffung des entstandenen Wasserdampfes, in offenen Räumen also mit Vermehrung des Luftzuges. In einen bestimmten Raum von bestimmter Temperatur geht nämlich nur eine bestimmte Masse Dampf desselben Stoffes hinein, der Raum mag leer oder schon mit Dämpfen anderer Stoffe gefüllt sein. Die Spannung aller in einem Raume enthaltenen Dämpfe ist nach Dalton gleich der Summe der Spannkräfte der einzelnen Dampfarten. Die hiermit charakterisirte Eigenschaft der gasförmig gewordenen Körper macht auf den ersten Augenblick stutzig, man erwartet das Gegentheil. Indeß erwäge man, daß im gasförmigen Zustande nur die Atome desselben Stoffes einander abstoßen, die fremden Massentheilchen sich dagegen anziehen, so daß viele ungleichartige Atome in demselben Raume sich ansammeln können, für den nur wenige aber gleichartige ausreichen. Im luftleeren Raume muß demnach die Verdunstung am rascheſten erfolgen und in einem andern, der die gleichartigen Dämpfe des verdampfenden Stoffes nicht enthält, rascher als wenn das der Fall ist. Die Verdampfung wird behindert, der Kochpunkt also erhöht, wenn man den Raum, in den der Dampf hineindringt, dem Maße nach verkleinert oder absperrt. Jedem Raume kommt bei einer bestimmten Temperatur eine bestimmte Dampfmasse zu, und man spricht daher von einem Sättigungspunkte. Einen nicht gesättigten Raum kann man durch Verkleinerung oder Abkühlung sättigen; Dämpfe in nicht gesättigtem Raume nennt man überhitzte. Dämpfe verhalten sich in jedem Falle wie permanente Gase. Wasserdampf von 100° ist demnach von derselben Beschaffenheit wie atmosphärische Luft in Bezug auf den Raum, der eingenommen wird. Man weiß nun, daß in einer Höhe von 23^{m},54 das Quecksilber im Barometer bei einer mittlern Temperatur von 18,75°,

vorzüglichste Anwendung desselben, nämlich dünne Eisenbleche mit einem feinen Zinküberzuge zu versehen, um sie dadurch vor dem Roste zu schützen.

um $2^{mm},18$ niedriger steht daß also das Dichtigkeitsverhältniß der Luft und des Quecksilbers sich durch den Quotienten $\frac{218}{23540}$ $= 0,000093$ ausdrücken läßt. Es ist ferner Quecksilber $13\frac{1}{2}$ mal schwerer als Wasser, also ist dasselbe Verhältniß zwischen Luft und Wasser $= 0,000093 \cdot 13,5 = 0,00126$. Wasserdampf und Luft haben dieselbe Ausdehnung, also nimmt Wasserdampf einen Raum ein, der $\frac{1}{0,00126} = 790$ ungefähr mal so groß ist als Wasser im flüssigen Zustande (die genauere Zahl ist 772,8; eine weniger genaue, aber für das Gedächtniß ausreichende ist 800).

Da die einer Flüssigkeit zuströmende Wärme nicht bloß den auf ihrer Oberfläche ruhenden Druck zu überwinden hat, sondern auch die Cohärenz der Flüssigkeitstheilchen an einander, sowie der Adhärenz derselben an die Gefäßwände, so hängt die Höhe des Siedepunktes ferner noch von diesen beiden Factoren ab, sie ist um so niedriger, je geringer beide, und um so höher, je größer beide Kräfte sich erweisen. In diesem Umstande liegt auch der innere Grund für die Erhöhung des Siedepunktes durch Lösungen von Salzen in Wasser. Das flüssig werdende Salz füllt nämlich die Wasserporen zum Theil aus, vermehrt darum die Berührungsstellen der einzelnen Flüssigkeitsmoleküle und somit die Cohäsion derselben. Versuche von Magnus.

Alle diese Thatsachen sind dem verständigen, wenn auch ungelehrten Menschen vollständig bekannt. Eine erfahrene Wäscherin trocknet am liebsten in freier Luft, nicht in geschlossenen Räumen, lieber an trüben und stürmischen Tagen, als an hellen aber windstillen. Die Köchinnen benutzen zumeist tragbare Deckel, die sie bald ganz bald nur zu einem Theile über die Oeffnungen der Kochgefäße schieben: zu besonderen Zwecken ist auch der Papinianische Topf in unsern Küchen nicht unbekannt, da man leicht erkennt, daß in einem Kochgefäße mit hermetischem Verschluß der Oeffnung sowohl Zeit und Brennmaterial gespart werden als auch härtere Stoffe mürbe und gar gemacht werden können. Wenn der gewöhnliche Mann beim Eintritt von Frostwetter sagt: „es ist gut, daß kein Schnee liegt, sonst würde die Kälte nicht aus-

zuhalten sein", so scheint für den ersten Augenblick der Ausspruch übereilt zu sein; er ist aber leicht zu rechtfertigen. Liegt bei starkem Froste Schnee, so tritt dennoch trotz der Kälte und trotz des kalten Luftraumes, in den nicht so viel Wasserdampf geht als in einen relativ wärmern, namentlich bei bewegter Luft, eine rasche Verdunstung des Schnees ein und damit eine empfindliche Verdunstungskälte, die um so wirksamer sich zeigt, je größer die Verdunstungsfläche. Auf dem Montblanc kocht das Wasser schon bei 86°. Andere Zahlen sind ebenfalls von einiger Wichtigkeit Ein Kubikmeter faßt 4,8 Gr. Wasserdampf von 0°, 22,79 Gr. bei 25°, 607,5 Gr. bei 100°, 7861 Gr. bei 200°. Der Druck einer Dampfmasse von 0° wird durch $4^{mm},6$ Quecksilberhöhe fixirt, bei 50° resp. 100°, 200° sind die relativen Höhen 92^{mm}, 760^{mm}, 11689^{mm}. Anders ausgedrückt 100gradiger Wasserdampf ist gleich einer Atmosphäre, 150gradiger ist gleich $4^3/_4$ Atmosphäre, 180gradiger aber schon 10 Atmosphären. — Versuch von Dulong und Arago.

Die bekannte Erscheinung des Leydenfrost'schen Tropfens darf hier nicht übergangen werden. Fällt nämlich ein Wassertropfen in eine glühende Platinschale, so verdunstet sofort der auffallende Theil des Tropfens, und der dadurch entstehende Wasserdampf hüllt den Rest des Wassers in eine Dampfatmosphäre von solcher Expansivkraft, daß derselbe in einiger Entfernung vom glühenden Schalenboden tanzend herumgetrieben wird. In neuerer Zeit hat Boutigny, hierauf gestützt, interessante Versuche gemacht, und gefunden, daß z. B. weiß glühendes Eisen die Hände nicht verletzt, die durch dasselbe hindurchfahren. Es liegt der Schluß nahe, daß die Experimente von Gauklern, wie auch die mittelalterlichen Gottesurtheile durch Feuerproben auf dieser Erscheinung beruhen.

17. Ist die Wärme gehinderte Bewegung, so muß in Körpern, deren Moleküle nahe zusammenliegen, die Bewegung einerseits sich rasch vollziehen, und mithin der Molekularwiderstand schnell empfunden oder sichtbar werden, schneller wenigstens als in losen, weniger dichten oder sogar in flüssigen Körpern, deren Theilchen nicht so stark durch Cohäsion verbunden, mithin leicht

verschiebbar sind, andrerseits wird in diese ein größeres Maß äußerer Wärme hinübergeführt werden müssen, um eine bestimmte Temperatur zu erzielen. Die in diesen theoretischen Anschauungen enthaltenen thatsächlichen Erscheinungen werden uns durch die Begriffe der Wärmeleitung, der Wärmecapacität und der specifischen Wärme vermittelt; dieselben lassen sich an dieser Stelle durch eine kurze Erörterung erledigen.

Man unterscheidet gute, mittlere und schlechte Leiter der Wärme in folgender Reihenfolge: Metalle — Gold, Platin, Silber, Kupfer, Eisen, Zink, Blei, — Steine, Glas, gebrannter Thon, Wasser und Flüssigkeiten außer Quecksilber, Holz — Nußbaum, Eiche, Fichte, Pappel, Cork, — Kohle, Asche, Stroh, Häckerling, Haare, Leinwand, Wolle, Baumwolle, Seide, Federn, Papier, Schnee, Eis, Luft. Hierbei versteht es sich von selbst, daß äußere Umstände das Leitungsvermögen verändern können, wie z. B. das Verhalten von grünem und trocknem Holze oder die Leitung der Holzfaser nach der Quere oder der Länge hin das hinlänglich beweist. Diese Thatsachen werden im gewöhnlichen Leben auf das vielfachste benutzt. Der Schäfer zieht seinen Pelz auch im Sommer nicht aus, weil er weiß, daß derselbe Umstand, der im Winter die Körperwärme nicht nach außen treten läßt, es im Sommer verhindert, daß die größere Außenwärme an den Körper herantritt. Pumpen und Röhrenleitungen umgiebt man mit Strohgeflechten, Eiskeller mit Torfgerieß, Asche und trockener Luft. Doppelfenster und doppelte Fußböden wehren dem Abzuge der Wärme durch die schlecht leitende und zwischen den beiden Wänden eingeschlossene Luft. Für die Küche gibt man eisernen dem Feuer auszusetzenden Gefäßen hölzerne Handhaben, kocht man in eisernen Töpfen lieber als in solchen von Thon oder Porzellan, schützt man dicke Gläser vor dem Zerspringen beim Niedersetzen auf heiße Platten durch Zwischenlegen von Papier. In Familienstuben benutzt man Kachelöfen, die die Wärme länger anhalten als eiserne, welche besonders für solche Räume zweckmäßig sind, die nur zeitweise und dann rasch erwärmt werden sollen. Hemden von Leinwand sind weniger gesund als solche von Baumwolle oder Seide, da dieselben viel

eher einen schädlichen Temperaturwechsel zulassen als baumwollene oder seidene. Hölzerne Häuser sind im Winter wärmer als steinerne, Strohdächer für Wirthschaftsgebäude zweckmäßiger als solche von Ziegel oder Schiefer: Zinkdächer erinnern an die Bleidächer Venedigs. Unterkellerte Häuser zeichnen sich durch warme Fußböden aus. Kaltes Eisen ist für das Anfassen eben so gefährlich als rothglühendes; Quecksilber ist (im Winter) kälter als Wasser.

Wenn man mit Despretz die Leitungsfähigkeit des Goldes = 1000 setzt, so sind die entsprechenden Werthe für Platin, Silber, Kupfer, Eisen, Zink, Blei, Marmor, Porzellan, Ziegel abgerundet und der Reihe nach 981, 973, 898, 374, 363, 303, 179, 23, 12, 11.

Bei Flüssigkeiten verbreitet sich die Wärme durch Leitung, wenn die Erwärmung von oben nach unten, also von der Oberfläche bis zum Grunde fortschreitet, andernfalls bei der Erwärmung von unten herauf durch Leitung und Strömung. Hierauf beruhen die Anwendungen in Wasser- und Luftheizungen, die Theorie der Schornsteine, die Luft- und Meeresströmungen, und mehre andre bekannte Erscheinungen. Die Gesetze der Leitung bei flüssigen Körpern und bei Gasen sind übrigens dem bei festen Körpern analog. Alle diese in eine Einheit gebrachten Thatsachen sind um eine neue zu vermehren, die mehr als viele andere die Theorie bestätigt, es sind die durch Wärme erregten Töne. Geht nämlich die Wärme von einem guten Leiter zu einem schlechten über, so wird die Bewegung gehindert, und der gute Leiter, für dessen Nichtbeweglichkeit gesorgt ist, geht in stehende Schwingungen über — Trevelyan-Instrument, Thermophon.

Die Ausgleichungen der Wärmeverhältnisse zwischen gleichartigen und ungleichartigen Körpern sind wichtig genug, um anzuführen, daß gleiche Maße Wasser von 10° und 30° nach dem Zusammengießen 20° zeigen, und daß nach einer leichten Ueberlegung die Mischtemperatur für verschiedene Maße m_1, m_2 und m_3 und verschiedene Einzeltemperaturen t_1, t_2, t_3 nach der Formel für Mittelwerthe

$$t = \frac{m_1\, t_1 + m_2\, t_2 + m_3\, t_3 + \cdot\cdot}{m_1 + m_2 + m_3 + \cdot\cdot}$$

zu berechnen ist. Anders verhalten sich ungleichartige Körper. Wenn 1 Gr. Wasser von 20° C und 1 Gr. Eisen von 60° nach dem Eintauchen des letztern in ersteres nur 24° als gemeinschaftliche Mitteltemparatur zeigen, so muß der Verlust von 36° auf Seite des Eisens einen Wärmezuwachs von 4° auf Seite des Wassers hervorgerufen haben, d. h. das Wasser bedarf 9mal so viel Wärme als das Eisen, um gleiche Temparaturzunahme wahrnehmen zu lassen. Anders ausgedrückt: das Fassungsvermögen — die Wärmecapacität — des Wassers ist 9mal so groß als die des Eisens. Das Quecksilber hat 33mal, das Leinöl 2mal so wenig Wärme nöthig als Wasser. Nennt man die Wärme, welche nöthig ist, um eine Maßeinheit zu einer bestimmten Temperatur zu erheben (1 Gr. um 1 Grad) die specifische Wärme und setzt die des Wassers = 1, so ist die

des Stahles = 0,116 der Holzkohle = 0,241
des Glases = 0,192 der atmosph. Luft = 0,237
und des Wasserdampfes = 0,847.

In der Natur der Sache liegt es endlich, daß mit zunehmendem Volumen und zunehmender Temperatur die Wärmecapacität wachsen muß, wie schon früher auseinander gesetzt ist, und womit die Identität oder Wechselbeziehung der Begriffe, Abkühlung und Verdünung, Erwärmung und Verdichtung der Körper festgestellt ist.

Drittes Kapitel.

Die andauernd oder momentan fixirten Molekularbewegungen.

Magnetische und electrische Erscheinungen.

18. Unter den Eisenerzen (steinartig aussehende Verbindungen des reinen Eisens mit andern Stoffen) ist der Magneteisenstein

vorzugsweise deshalb bekannt geworden, weil er Eisen, Nickel und Kobalt und andre diese genannten Stoffe enthaltende Körper nicht nur bei unmittelbarer Berührung, sondern auch aus der Ferne anzieht, in letzterer jedoch mit abnehmender Kraft, so daß diese in der 2- oder 3- oder 4fachen Entfernung um das 4- oder 9- oder 16fache vermindert erscheint. Die magnetische Anziehung wird auch durch zwischengeschobene Körper hindurch bewirkt und äußert sich an zwei Punkten — den Polen — am stärksten in der Weise, daß sie in der Mitte der die beiden Pole verbindenden Geraden, der Axe des Magneten — als dem Indifferenzpunkte ganz verschwindet, während sie von diesem Punkte aus nach beiden Seiten zu den Polen hin stätig zunimmt. Jeder von einem Magneten angezogene Eisenstab wird so lange er mit demselben in Berührung bleibt, selbst ein Magnet, und vermag einen zweiten, so wie dieser einen dritten Eisenstab emporzuziehen: wird aber die Verbindung des ersten Eisenstabes mit der Magnetismusquelle unterbrochen, so fällt die ganze Kette auseinander. Besteht jedoch der Stab nicht aus weichem, sondern aus gehärtetem Eisen, aus Stahl, so behält er die gewissermaßen geborgte Kraft als eine ihm eigenthümlich gewordene dauernd bei, wofern nur die Berührung mit dem Magneten lange genug angehalten hat. Hierin hat man das Mittel gefunden, sich künstliche Magnete zu verschaffen. Ein länglicher Stahlstab wird z. B. um den einfachen Strich anzudeuten, zwischen zwei feste Haltpunkte gelegt, dann setzt man einen Pol eines ebenfalls stabförmigen Magneten in der Mitte auf und streicht nach dem einen Ende hin, hebt hier auf, setzt wieder denselben Pol in der Mitte auf und streicht zum zweiten, dritten ꝛc. Male nach dem gewählten Ende. Dann nimmt man den andern Pol, setzt ebenfalls in der Mitte auf und streicht nun nach dem andern Ende des Stahlstabes hin, auch hier das Verfahren mehrmals wiederholend. Der gewählte Stahlstab ist hierdurch ein Magnet geworden. Wird ein solcher in mehrere Theile zerbrochen, so ist jeder Theil für sich ein neuer selbständiger Magnet. Dem geraden Stabe gibt man auch eine Hufeisenform, und unterscheidet von den stab- und hufeisenförmigen Magneten die Magnetnadeln,

welches langgestreckte, rautenförmige und dünne Stahlplättchen sind, die sich entweder in horizontaler — Declinationsnadeln — oder in verticaler Ebene — Inclinationsnadeln — frei bewegen können und nach gestörtem Gleichgewicht allemal nach einigem Hin- und Herschwanken eine feste Lage annehmen. Bei der Declinationsnadel zeigt der eine Pol nach Norden, wenigstens im allgemeinen, der andere also ebenso nach Süden, ersterer heißt demnach der Nord- letzterer der Südpol. Zwischen beiden Polen findet ein merkwürdiger Gegensatz dahin statt, daß gleichnamige Pole sich abstoßen, ungleichnamige sich dagegen anziehen. Hängt man daher etwa an den Nordpol eines Stabmagneten, den man daran erkennt, daß er den Nordpol der Nadel forttreibt, einen weichen Eisenstab, und nähert darauf der Berührungsstelle den Südpol eines ungefähr gleich starken zweiten Stahlmagneten, so fällt der weiche Eisenstab ab. Dieser eigenthümliche (polare) Gegensatz ist Veranlassung geworden, zwei magnetische Kräfte, zwei Arten von Magnetismus in die physikalische Sprache aufzunehmen, einen Nord- und einen Süd-Magnetismus, wenngleich beide außer in dem erwähnten Gegensatze ganz und gar in den andern Wirkungen übereinstimmen. Beiäufig mag noch bemerkt werden, daß ein Magnet dessen Kraft stets geübt wird, mag er nun zum Magnetisiren andrer Stahlstücke benutzt, oder mögen seine beiden Pole durch einen weichen Eisenstab mit einander verbunden, und dieser Anker mit von Zeit zu Zeit sich mehrenden Gewichten beschwert werden, an Kraft nicht nur nicht verliert, sondern vielmehr gewinnt, so wie daß plötzliches Abreißen des Ankers oder sein gänzliches Fehlen und höhere Wärmegrade den Magnetismus allmälig oder auf einmal vernichten.

Das ist ein kurzer Ueberblick über die Lehre vom Magnetismus, wie sie durch Schulexperimente erläutert zu werden pflegt. Die weiterführende Erklärung erfordert zunächst die Erledigung der Vorfrage, wie man sich die Wirkung eines Magneten auf einen weichen oder harten Eisenstab zu denken habe. Dieser Eisenstab wird jedenfalls ein Magnet und zeitweise oder dauernd leistet er dieselben Wirkungen höchstens mit etwas verminderter

Intensität wie der Magnet, von dem er seine Kraft herschreibt. Daß letzterer von seiner Kraft an den Eisenstab abgegeben habe ist undenkbar, weil seine Kraft eben ungeschwächt fortdauert und weil sein Nordmagnetismus nicht etwa Nordmagnetismus sondern grade zuerst Südmagnetismus und erst in weiter Ferne auch Nordmagnetismus hervorruft. Ein Magnet wirkt also vor allem nicht durch Mittheilung, es ist nur denkbar, daß der Eisenstab der magnetisch gemacht wird, beide Magnetismen in gebundenem Zustande enthält, die nun durch die Einwirkung des Magneten getrennt und vertheilt werden. Doch nicht in der Weise können die gebundenen Magnetismen von einander getrennt werden, daß die eine in die eine, die andere in die andere Hälfte des Eisenstabes fließe, denn dann würde derselbe, zum Magneten geworden, im Falle des Zerbrechens nicht zwei Magnete liefern, sondern gar keinen, weil jedem Theile der polare Gegensatz fehlt. Es ist nur die Annahme möglich, daß jedes Atom des Stabes beide Magnetismen gebunden enthalte und daß durch magnetische Krafteinwirkung dieselben innerhalb der Grenzen eines Atomes so getrennt werden, daß etwa der Südmagnetismus in dem Theile des Atomes sich festsetze, welche dem Nordende des angewandten Magnetes zunächst liegt, während der Nordmagnetismus von der andern Hälfte des Atoms Besitz ergreift. Denken wir uns, um näher hierauf einzugehen, ein Eisenstäbchen in der Form einer Stricknadel in etwa sechs Theile getheilt, von denen jeder Theil uns ein Atom veranschaulichen soll, so wird durch Annäherung des Nordpoles eines Magneten das erste Atom in der ersten Hälfte Süd- und in der zweiten Hälfte Nordmagnetismus aufweisen; die zweite Hälfte des ersten Atomes wirkt ebenso vertheilend auf das zweite Atom, und die zweite Hälfte dieses in derselben Weise auf das dritte Atom. Es entstehen somit zwölf Hälften so beschaffen: daß nur zwischen der 2. und 3., der 4. und 5. ꝛc. eine Trennung des Zusammenhanges möglich ist, da ja Atome nicht ferner zertheilt werden können, und daß die ungeraden 1, 3, 5 ꝛc. Südmagnetismus, die gerade Hälften dagegen 2, 4, 6 ꝛc. Nordmagnetismus haben. Nehmen wir ferner eine dauernde Vertheilung an, so werden sich offenbar die entgegen-

gesetzten Magnetismen der 6. und 7. Hälfte aufheben oder gegenseitig binden, ebenso auf der einen Seite die der 4. und 5., der 2. und 3. auf der andern dagegen die der 8. und 9., der 10. und 11. Vollkommen heben oder binden sich nur 6 und 7, während die von 1 und 12 vollkommen wirksam bleiben, wenn der magnetisirende Stab fortgenommen ist; der Südmagnetismus von 1 wirkt aber in die Ferne und also bindend auf den Nordmagnetismus von 2 und 4, mehr wenigstens als die nordmagnetische Kraft von 12 bindend wirkt auf den Südmagnetismus von 3 und 5. Es bleibt also hier ein Ueberschuß des Südmagnetismus, wie umgekehrt auf der andern Seite bei 8 und 10 ein Ueberschuß des Nordmagnetismus vorhanden sein wird, so daß nicht allein die Polarität des Eisenstäbchens als möglich nachgewiesen ist, sondern auch die damit verwandten Erscheinungen ihre Erklärung finden, nach denen auf der einen Seite die eine Art, auf der andern dagegen die zweite Art des Magnetismus enthalten und beide von den Polen her gleichmäßig abnehmen, in der Mitte des Stäbchens aber einen Punkt voller Wirkungslosigkeit, den Indifferenzpunkt erzeugen; auch liegt bei der Zertheilung des einen Magneten in mehere nun der 0-Punkt der Kraftäußerung stets in der Mitte jedes neuen Magneten.

Es ist an dieser Stelle nicht angänglich aber auch nicht nothwendig, eine tiefere Erfassung der angeführten Thatsachen durch den Nachweis ihres Zusammenhanges mit andern scheinbar ganz unähnlichen zu vermitteln. Indessen soll doch angeführt werden, daß da die magnetischen Erscheinungen an Stoffen von höchster Cohärenz der Massentheilchen dauernd gebunden sind, der Magnetismus als eine Folge der Natur und namentlich der Cohärenzverhältnisse der Stoffe einerseits, anderseits des Vermögens der Atome, innerhalb der Körperräume zwischen gewissen Gleichgewichtslagen schwingende Bewegungen beizubehalten (siehe §. 14 Schluß) anzusehen ist, daß mithin von Magnetismus nicht als Kraft, noch weniger aber von Magnetismus als einem fließenden möglichst flüchtigen und auch schweren Stoffe, gewiß aber nicht von zwei verschiedenen Magnetismen die Rede sein darf, sondern nur von verschiedenen Schwingungsphasen der Hälften

der Atome, die im magnetisirten Stahle durch eine Vierteloscillation derselben reihenweise gleichmäßig geordnet und in dieser Ordnung für die Dauer fixirt und festgestellt sind. Wenn Wärme ebenso wie das gewaltsame Abreißen des Ankers den Magnetismus schwächt, so sind beide Thatsachen nur eine Lockerung der Cohärenzverhältnisse in zwei verschiedenen Formen und der Gegensatz zu der Erscheinung, daß die Massentheile eines weichen Eisenstabes durch Magnetisiren einen festern und sprödern Zusammenhang erhalten. In dieser Umwandlung der Cohärenz besteht auch das Wesen der sogenannten Coercitivkraft, eines Begriffes, den die neuere Physik somit ganz entbehren kann. Im Uebrigen ist das Wärmeleitungsvermögen eines Magnetstabes in der Richtung der magnetischen Axe am geringsten, während es in der darauf senkrechten Richtung am stärksten ist.

19. Während die magnetischen Erscheinungen am Magneteisenstein und am gehärteten Eisen dauernd haften, sind die analogen electrischen Thatsachen unter gewissen Umständen an allen Körpern und Stoffen aber nur als momentane oder nur kurze Zeit andauernde wahrzunehmen. Weitere Betrachtungen führen damit zur Annahme, daß der Magnetismus als der fixirte Zustand einer Ruhelage der Atome nach geschehener Bewegung zu betrachten sei, während bei der Electricität diese Ruhelage nur auf eine kürzeste Zeitdauer erscheint, um den frühern indifferenten Zustand wieder zu erhalten, woraus denn folgt, daß die Electricität nur an der Oberfläche der Körper haftet, und daß mit der an dieser sich rasch vollziehenden electrischen Bewegung auch die secundären Erscheinungen des Lichtes, des Schalles und der Wärme sich einfinden, während beim Magnetismus als solchem keine Spur davon nachzuweisen ist.

Sehen wir vorläufig die Electricität an als die unbekannte Ursache der A n z i e h u n g und A b s t o ß u n g leichter Körperchen zu und von einander, eines e i g e n t h ü m l i c h e n G e r u c h e s, den man früher wohl als schwefel-phosphorartig zu charakterisiren pflegte, der p r i c k e l n d e n G e f ü h l s e m p f i n d u n g, als wenn Spinnengewebe die Haut bedecken, d e s h ö r b a r e n K n i s t e r n s u n d d e s s i c h t b a r e n F u n k e n s, so dürfen wir ferner, an-

führen, daß alle diese Erscheinungen zusammen auftreten, wenn die Electricitätsentwicklung kräftig genug ist. Bei der geriebenen Glas- oder Siegellackstange nimmt man nur Anziehungen und Abstoßungen wahr, der gepeitschte Harzkuchen des Electrophors zeigt außerdem schon Knistern und Funken, noch mehr verstärkte Wirkungen dieser Art so wie des Geruches und des Gefühles durch Nerven-Erregungen finden bei der Electrisirmaschine und der leydner Flasche oder der aus mehreren Flaschen zusammengesetzten Batterie statt; das Gewitter endlich bietet Kraftäußerungen und Effekte dar, vor denen der Mensch sich furchtsam verkriecht, die aber alle in der urplötzlich auftretenden Zerreißung der Cohärenz der Körpertheile sich vereinigen lassen.

Umgekehrt ruft jede Störung der Gleichgewichtslage in den Oberflächen-Massentheilchen der Körper electrische Erscheinungen hervor; also Druck, Spaltung, Erwärmung, chemische Anziehung (Contact), Reibung. Da wie schon angedeutet, in den bei weitem meisten Fällen die erregende Ursache von so kleinen Wirkungen begleitet ist, daß eine unmittelbare Wahrnehmung nicht möglich ist, so bedarf man besonderer Instrumente und Apparate um die Wirkungen zu vervielfachen und durch Summirung zur Anschauung zu bringen; es braucht nur an den Voltaischen Condensator, den Schweiggerschen Multiplicator und das Galvanometer erinnert zu werden. Nach einer andern Seite ist darauf aufmerksam zu machen, daß man zwischen momentanen und starken Erregungen und zwischen geringen aber stetig andauernden unterscheiden muß, da bei erstern große Wirkungen eintreten und alsbald verschwinden — Reibungs- oder statische Electricität — bei letztern dagegen meist sehr geringe aber weithin sich fortpflanzende — Galvanismus. Die angeführten Namen gehören ältern Anschauungen an, die neuere Physik weist sie aus ihrer Sprache heraus oder verknüpft mit den noch gebräuchlichen Worten andere Begriffe. Wenn endlich noch angeführt werden kann, daß schon seit längerer Zeit eine nach ältern Vorstellungen stattfindende mittheilende Wirksamkeit der Electricität aufgegeben worden, daß namentlich die Construction der Influenzmaschine die Einheit der Erklärung zwischen der Theorie des Electrophors und der Elec-

trisirmaschine hergestellt, so sind die neuern Wandlungen in der Electricitätslehre für unsern Zweck hinreichend angedeutet.

20. Ein genaues Verzeichniß oder nur eine Uebersicht auch nur der wichtigsten Erscheinungen der Electricität zu geben, kann hier nicht beabsichtigt werden, es sollen nur die bedeutsamsten ausgewählt werden insofern sie dem Zwecke dienen, Einsicht in das große und wichtige Gebiet zu gewinnen, und dem Einzelnen die richtige Stellung anzuweisen.

1. Wenn man eine Siegellack- oder eine Glasstange mit Seide, Wolle oder Haar reibt, so ziehen dieselben leichte Körperchen an, und stoßen sie nach kurzer Berührung wieder ab, dabei wirkt jeder Punkt der Stange nur einmal. Dasselbe geschieht mit andern geriebenen Körpern namentlich mit Metallen, wenn sie nicht unmittelbar in die Hand genommen, sondern mit gläsernen Handhaben angefaßt werden. Die Erscheinuug tritt am unmittelbarsten hervor, wenn die Stange oder die zu reibenden Körper zuvor erwärmt sind.

2. Zwei Korkkügelchen, an seidenen Fäden aufgehängt, ziehen einander an, wenn das eine mit einer geriebenenen Harzstange, das andere mit einer durch denselben Stoff geriebenen Glasstange berührt worden. Wenn die seidenen Fäden nicht trocken, sondern feucht sind oder aber wenn sie durch leinene oder metallene ersetzt werden, so erfolgt keine Anziehung der Korkkügelchen.

3. Wenn ich den Harzkuchen eines Electrophors mit Wolle oder Haaren reibe, so kann kann ich ihm mit dem Knöchel meines Fingers an den verschiedensten Punkten Funken entziehen. Wenn ich auf ihn einen kleinen Metalldeckel lege, der an einer Seite mit gläserner Handhabe versehen ist, so wird der Deckel electrisch gemacht, wenn er zuvor an der der aufliegenden entgegengesetzten Fläche mit dem Finger berührt worden, d. h. er zieht jetzt wie der Harzkuchen selbst an und stößt ab, und gibt dem genäherten Fingerknöchel Funken; es erfolgen weder Funken noch Anziehungen, wenn der Deckel abgehoben wurde ohne berührt zu sein. Nehme ich eine leydener Flasche, und nähere ihrem Knopfe für die innere Belegung den berührten und abgehobenen Deckel, so springt ebenfalls ein Funken über. Nach mehrmaliger Wieder-

holung des Vorganges wird die Flasche geladen; ihre Entladung gibt einen vielmals größern Funken. Werden mehrere Flaschen geladen, und zu einer sogenannten (statisch-) electrischen Batterie vereinigt, so sind mit dem Entladnngsfunken brennbare Körper zu entzünden, Metalldrähte zu schmelzen, andere Nichtleiter der Electricität zu zerschmettern und thierische Körper zu tödten. Wenn die Entladung des Electrophordeckels mit einem Knistern verbunden, so gibt die der electrische Batterie einen lauten Schlag. Was die Batterie im physikalischen Versuchszimmer, das ist das Gewitter in der Atmosphäre; Blitz und Donner sind Funken und Entladungsschlag bei dieser. Die gewöhnliche Electrisirmaschine ist nur eine bequemere Form des Electrophors und beider Wirksamkeit findet eine wörtlich übereinstimmende Erklärung.

Nehmen wir nun fürs Erste zwei verschiedene Electricitäten, die des Glases und die des Harzes an, falls beide durch denselben Reiber entstanden sind, so ergibt sich zunächst als Polaritätsgesetz: gleichnamige Electricitäten stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an. In Bezug auf die Leitung gibt es gute, mittlere und schlechte Leiter der Electricität; eine aufzustellende Reihenfolge der Körper ist mit der Wärmeleitungsscala fast identisch und auch hier sind Metalle und Flüssigkeiten gute Leiter; nur die Kohle ist als ein guter Leiter der Electricität aber als ein schlechter der Wärme bekannt. Der Akt der Leitung geht unter denselben Bedingungen und in derselben Weise vor sich, wie es im Vorhergehenden bei dem Magnetismus geschildert ist. Ein electrischer Körper wirkt vertheilend auf den gewöhnlichen Zustand eines nicht electrischen, zieht in das ihm benachbarte Ende desselben die entgegengesetzte, und stößt in das fernerliegende andere Ende die gleichnamige Electricität. Da aber die Vertheilung molekularweise vor sich geht, so entsteht zwischen dem electrischen und electrisch gemachten Körper ein Indifferenzpunkt, in dem sich die entgegengesetzten Electricitäten binden, also anscheinend verschwinden, während auf dem electrisch gemachten Körper die dem ersten electrischen Körper gleichnamige Electricität wahrnehmbar hervortritt. Hierauf gründet sich das abwechselnde Spiel des Abstoßens und Anziehens, was der oberflächlichen Anschauung

so oftmals widerspricht. Der menschliche Körper ist ein guter Leiter, auch seine Moleküle empfinden Leitung und Leitungswiderstand, daher das prickelnde Gefühl in der Nähe stark electrisch erregter Körper. Sind zwei starke und entgegengesetzte Electricitäten einander genähert, so erfolgt durch den Luftzwischenraum eine schnelle Vertheilung von beiden Seiten her in den Luftatomen, in der Mitte derselben stoßen entgegengesetzte Electricitäten auf einander und hindern nun jede fernere bewegende Vertheilung. Das Resultat der gehinderten Bewegung ist der electrische Funken, der ihn begleitende Schall das Ergebniß der starken Lufterschütterung. Umgekehrt liefert der electrische Funken den Beweis, daß vor ihm entgegengesetzte Electricitäten vorhanden waren. Je weniger gute Leiter die Luftatome sind, je trockener also die Luft ist, desto ungehinderter zeigen sich die berührten Erscheinungen.

Aber auch die Vorstellung von zwei verschiedenen und entgegengesetzten Electricitäten muß aufgegeben werden, wenngleich dieselben in ihren Wirkungen (Lichtenberg'sche Figuren) zuweilen kleine Unterschiede zeigen. Zunächst ist von der Thatsache Notiz zu nehmen, daß Glas mit Wolle und Seide gerieben die sogenannte Glaselectricität zeigt, daß aber im Falle der reibende Körper ein Katzenpelz ist, die Harzelectricität hervortritt. Entscheidend aber sind die Erscheinungen beim Turmalin, der durch bloßes Erwärmen in der Art electrisch wird, daß das eine Ende Glas- das andere Ende aber Harzelectricität zeigt, und daß seine durch Zerbrechen entstandenen Theile jeder für sich dieselbe Erscheinung wiederholen. Noch mehr, beim Erkalten des Turmalins zeigen sich an den Enden wechselnde Electricitäten, was beim Boracit und Titanit sowohl bei steigenden als bei fallenden Temparaturen der Fall ist. Somit haben alle Körper nicht einen sogenannten gebundenen electrischen Zustand; es gibt keine sogenannte electrische Kräfte oder Fluiden, die Electricität ist das Resultat einer eigenthümlichen Bewegung der Oberflächenmassentheilchen der Körper.

21. Die vorhin besprochenen Erscheinungen gehören zu dem Gebiete der wenn nicht momentanen doch immer nur kurze Zeit andauernden; es ist jetzt der electrische Strom zu betrachten. Die von Galvani gemachte Entdeckung, welche zuerst durch Volta eine

genügende Erklärung fand, und in der folgenden Zeit durch Davy, Wollaston, Bequerel, Faraday, Bunsen, Oersted, Ampère und viele andere in bewunderungswürdiger Weise ausgebildet wurde, besteht einfach darin, daß von der Berührungsstelle zweier heterogenen Körper aus eine electrische Vertheilung stattfindet, die an dem einen Ende die Glas- oder positive (+) Electricität, an dem andern Ende die Harz- oder negative (—) Electricität erscheinen läßt, und zwar meist in so kleinen Massen, daß es erst des Voltaischen Condensators bedurfte, um die Entdeckung nicht allein zu erklären, sondern auch nur sichtbar zu machen. Die hier auftretende Electricität kommt aber aus einer nie versiegenden Quelle, und die Bewegung in welche durch dieselbe die Körpermoleküle versetzt werden, ist aus diesem Grunde eine stetig andauernde, die in dem Begriffe des electrischen Stromes früher einen angemessenen Ausdruck fand. Man sprach dabei noch von dem Schließungsdrahte eines oder mehrer galvanischen Elemente, durch den sich die electrische Bewegung meilenweit mit einer Geschwindigkeit von 60,000 Meilen in der Secunde fortpflanzt, und damit auch von offenen und geschlossenen Ketten, alles Ausdrücke, an welche hier bloß zu erinnern ist. Vorläufig ist die Erklärung der neuen Thatsachen der vorhin gegebenen ganz conform; der electrische Funken entsteht hier, wenn man den Schließungsdraht der Kette durchschneidet, da dadurch die Bewegung unterbrochen und die gehinderte Bewegung nun in der Form von Wärme und Licht erscheint. Um aber weiter zu kommen, wollen wir die verschiedenen Wirkungen des electrischen Stromes als physiologische, als chemische, als magnetische und als thermisch-optische unterscheiden, und vorweg bemerken, daß sich alle in demselben Grundgedanken berühren, daß hervorgerufene und fortgeleitete Bewegung durch die sich entgegensetzenden Hindernisse und die damit gegebenen verschiedenen Anordnungen der molekularen oder atomistischen Gruppirung in den Körpern, welche sie theils neu gestalten theils auch nur mehr oder minder abändern, von den anscheinend so unfaßbaren und so ungewöhnlichen, wohl auch weit aus einander liegenden Erscheinungen die einzige und alleinige Ursache sei.

Die physiologischen Wirkungen des electrischen Stromes lassen sich im Allgemeinen als Nervenerschütterungen charakterisiren. Der Lebensproceß ist hauptsächlich nichts anderes als innerlich rasch sich verbreitende und von einem Centralpunkte ausgehende Bewegung des Nervensystems. Die Widerstände dieser Bewegung sind nicht zum geringsten Theile die Ursache der constanten Körpertemperatur, wie umgekehrt die Empfindungen des Kalt- und Warmseins auf Zusammenziehungen und Ausdehnungen der Körpermoleküle zu beruhen scheinen. Als secundäre Folgen der Nervenbewegungen sind electrische Ströme in allen Theilen des Körpers zu betrachten; sie ozonisiren den mit der atmosphärischen Luft eingeathmeten und in alle Organe und Gefäße des Körpers eindringenden Sauerstoff und machen ihn dadurch fähig, sich mit den Blutsäften zu verbinden, die dadurch erst für die eigentliche Ernährung geeignet werden. Es ist nämlich seit der Entdeckung des Ozons durch Schönbein bekannt geworden, daß der Sauerstoff an und für sich ein höchst indifferenter Stoff ist, ein solcher also, der sich nicht gern mit einem andern Stoffe verbindet, daß er aber durch electrische Strömungen, mögen sie nun direct oder indiret durch Temperaturdifferenzen hervorgerufen sein, wie man sagt ozonisirt wird — Ozon und Antozon —, daß er durch dieselben eine Aenderung erleidet, nach welcher er Verbindungen mit andern Stoffen höchst energisch ausführt. Auf dieser Ansicht beruht z. B. das Bleichen der Leinwand bei Sonnenschein, die Verbrennung der Kohle bei bestimmten Temperaturen, die Umwandlung des venösen Blutes in arterielles in allen Theilen des thierischen Körpers. Der schwefel-phosphorartige Geruch in der Nähe der Electrisirmaschine oder bei starken Gewittern ist nur dem in Ozon umgewandelten Sauerstoff zuzuschreiben, der nun den Geruchsnerven sich wirksam erweist.

Umgekehrt, ein electrischer Strom ist vielleicht im Stande, erlahmende vitale Bewegungen durch die von außen eingeleitete Erschütterung des Nervensystems zu kräftigen und die sich ankündigende Krankheit zu beseitigen. Von diesem Gesichtspunkte aus rechtfertigt sich der medicinische Gebrauch desselben, und Galvani's Entdeckung, nach welcher Froschschenkel, die vermittelst

kupferner Haken an einem eisernen Balken hingen und in Zuckungen geriethen, sobald ihre untern Theile ebenfalls in unmittelbare Berührung mit dem Eisenbalken kamen, ist nach dieser Seite hin zuerst und selbstverständlich unfruchtbar ausgebeutet worden; man glaubte eine Spur der so eifrig gesuchten Lebenskraft entdeckt zu haben, und wurde natürlich durch die Voltaische Erklärung sehr ernüchtert, die den thierischen Magnetismus ganz von diesem Gebiete ausschloß. In späterer Zeit haben die Untersuchungen Dubois-Reymond's dennoch die Existenz von Nerven- und Muskelströmen nachgewiesen und die auch anderweitig bekannte Thatsache näher entwickelt, daß das organische Leben sich physikalischer Vorgänge und Akte bedient, aber unmöglich aus denselben als ihrer Ursache hergeleitet werden kann. Die Vorgänge des Lebens, die Funktionen der Organe können wir erklären und uns verständlich machen, dem Ursprunge des Lebens sind wir darum auch nicht um eines Haares Breite begrifflich näher getreten. Organische Stoffe hat man synthetisch darzustellen vermocht, leider aber nicht lebensfähige, sondern nur solche, die durch Secretionen hervorgerufen werden, wie den Harnstoff. Der Tod zerreißt das Spiel der physikalischen Kräfte mit seinem Eintritte und der Körper, der vorher noch ihren Geboten unterworfen war, ist nicht im Stande, auch den kräftigsten, von außen künstlich angebrachten Reizungen Folge zu leisten. Damit ist nachgewiesen, daß das Leben als Ursache sich der physikalischen Kräfte als Mittel bedient, und daß voreilige Gedanken, deren Einseitigkeit in der Verwechselung von Ursache und Wirkung beruht, abgewiesen werden müssen.

22. Wenn man von chemischen Wirkungen des electrischen Stromes spricht, so meint man damit die Zerlegung der zusammengesetzten Körperatome in ihre einfachen Bestandtheile, und erklärt den Vorgang aus der erschütternden Bewegung, die das zusammengesetzte Atom in Folge des Stromes zu erleiden hat, durch welche eben so wie durch die ausdehnende Kraft der Wärme die anziehende Kraft der Bestandtheile überwunden wird, so daß sie auseinanderfallen. Nachdem Davy 1808 vermittelst der Voltaischen Säule die Alkalien, Kali und Natron in Sauerstoff

und Kalium resp. Natrium zerlegt hatte, führten sich für die Chemie neue Wege ein, die Natur der Körper durch Auflösen in ihre Bestandtheile zu ergründen, es begann eine neue Aera, denn man hatte nicht nur eine große Entdeckung gemacht, sondern auch die technischen Mittel gewonnen, andere neue Stoffe in ungeahnter Fülle zu entdecken. Das Davy'sche Experiment wird heute als Schulexperiment durch die Zersetzung des Wassers in Sauerstoff und Wasserstoff wiederholt, indem man die Poldrähte eines galvanischen Elementes in Wasser hineintaucht, wo sich dann alsbald der Wasserstoff am negativen (Kupfer-) Pole, der Sauerstoff aber am positiven (Zink-) Pole ausscheidet, oder in der Technik für die Zersetzung von Metallauflösungen benützt — Galvanische Vergoldung, Versilberung; Galvanoplastik. —

Ebenso wichtig als die Zerlegung der zusammengesetzten Körper in ihre Bestandtheile ist die Entdeckung Oersted's geworden, nach welcher der electrische Strom die Magnetnadel ablenkt, und bei hinreichender Stärke dieselbe senkrecht auf seine Richtung stellt (1822). Wie mehre Leydner Flaschen eine stärkere Entladung, wie mehre galvanische Elemente einen stärkern Strom mit leichter sichtbaren Wirkungen geben, so verstärken sich auch Ströme von geringer Intensität, sobald sie mehrfach parallel über einander gelegt werden. Wenn man daher einen Kupferdraht über ein oblonges Gestell 2000- bis 3000mal herumführt und durch denselben einen electrischen Strom hindurchgehen läßt, so erhält derselbe durch diese Anwendung eine 2000- bis 3000-mal verstärkte Intensität, wie sich mit einer astatischen Magnetnadel zeigen läßt. Durch diese Vorrichtungen (Schweiggerscher Multiplicator und Galvanometer) mißt man nicht allein die Stromstärken und somit die durch sie herbeigeführten Wirkungen, sondern man entdeckt auch Ströme, deren Vorhandensein man nicht einmal vermuthet hatte, wie die Dubois-Reymond'schen Untersuchungen es beweisen. Die Ablenkung der Magnetnadel gab einen Wink für den Zusammenhang zwischen Magnetismus und Electricität, man fand bald, daß weiches Eisen in Drahtwindungen mit electrischen Strömen magnetisch wurde, daß sich die Pole dieses Magneten umkehrten, sobald man den links gewun-

denen Draht mit einem rechts gewundenen vertauschte, man erkannte also, daß Drahtspiralen mit electrischen Strömen (Ampères Solenoide) Magnete nicht nur zu ersetzen vermochten, sondern auch, daß die auf diese Weise hervorgerufenen Magnete die stärksten seien, die überhaupt angefertigt werden können, man setzte in voller Consequenz das Gesetz des Magnetismus: „gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an" um in das der electrischen Ströme: „parallele Ströme verstärken sich, nicht parallele suchen sich parallel zu stellen" und faßte beide als identisch auf, wenn auch der Wortlaut ein ganz verschiedener ist. Wenn daher ein weicher, hufeisenförmig gebogener Eisenstab durch umgewundene Drahtspiralen ein Magnet wird, so lange den Draht ein electrischen Strom durchläuft, so muß er einen Anker, der einem Pole fest verbunden, an dem andern Ende loslassen, sobald der Strom unterbrochen ist, und eine Spiralfeder kann die Loslösung sichtbar erweitern. Man ist nun durch einfache technische Vorrichtungen im Stande, die Unterbrechung und Fortführung des Stromes nach Belieben zu bewirken und andauern zu lassen, an dem einen Pole somit das Spiel des Anziehens und Abstoßens des einseitig beweglichen Ankers beliebig zu reguliren und einen mit ihm am beweglichen Theile verbundenen Stift in die Höhe zu schnellen, damit er einen Eindruck hinterlasse auf einem Papierstreifen, der an einem Radumfange, welches vermittelst eines Uhrwerks herumgedreht wird, sich ohne Ende abwickelt. Das ist die Idee des electrischen Telegraphen, nach der Einrichtung, die durch die Morse'sche Technik realisirt worden.

Schiebt man über eine vom electrischen Strome durchlaufene Drahtspirale eine zweite, so wird in dieser ein neuer electrischer Strom inducirt, beide Ströme verstärken sich und bilden den Apparat, den man den Dubois'schen Schlitten nennt, und beim medicinischen Gebrauche hauptsächlich verwendet. Hat man umgekehrt einen um seine Axe drehbaren Magneten, und gibt man dem Anker ebenfalls die Hufeisenform und den umgewundenen Draht, so wird durch die Umdrehung des Magnetes um die Axe der Anker ein Magnet, und in seiner Inductions-

rolle ein electrischer Strom erzeugt, da man den Wechsel der Pole technisch unschädlich machen kann. Auf diesen Principien beruhen die magneto-electrischen Maschinen und viele andere Inductionsapparate.

23. Was nun endlich die thermo-optischen Wirkungen des electrischen Stromes anbetrifft, so sind die beiden Thatsachen heranzuziehen, daß durch ihn Wärme und Licht erzeugt wird — Funken, Schmelzen der Verbindungsdrähte, Kohlenlicht im luftleeren Raum, Geißler'sche Röhren — und daß zweitens umgekehrt Veränderungen in der molekularen Gruppirung innerhalb der Körper, wie sie namentlich durch ungleiche Erwärmung, also Temperaturdifferenzen hervorgerufen werden, electrische Ströme veranlassen, welche man auch in der schwächsten Intensität durch den Thermomultiplicator sichtbar machen kann. Es ist schon oben auf den Turmalin, den Boracit und Titanit aufmerksam gemacht; doch nicht diese allein, sondern viele andere Mineralien entwickeln durch Druck Wärme und werden dadurch electrisch. Wenn in einer Metallschale Schwefel geschmolzen wird, so zeigt die Schale positive, der isolirte Schwefel negative Electricität. Drähte mit harten und weichen oder mit dünnen und dicken Stellen geben an diesen verschiedenen Stellen bei der Erwärmung verschiedene Wärmeintensitäten, und demnach auch electrische Ströme, die durch die Magnetnadel nachgewiesen werden können. Bei Ketten aus verschiedenen Metallen, namentlich Blei und Wismuth, oder Antimon und Wismuth sind verschiedene Temperaturen an den Löthstellen die Ursache electrischer Ströme, welche bei hinreichender Stärke alle Wirkungen der früher genannten Ströme hervorbringen. Da endlich Thermomultiplicatoren Temperaturdifferenzen von 0,0002° angeben, so ist man durch sehr lange zusammengelöthete Eisen- und Kupferdrähte in den Stand gesetzt, Temperaturen des Erdinnern und des Meeres in größern Tiefen zu bestimmen.

Endlich ist noch zu bemerken, daß der electrische Strom auch Töne erregt, was nach den frühern Anführungen über Knistern und Donnerknall nicht auffallend sein kann. Der entscheidende Versuch besteht darin, daß man eine Inductionsrolle,

in der ein ununterbrochener Strom circulirt, mit einer kleinen Metallröhre umgibt, deren Ränder bis zur losen Berührung umgebogen sind. Es lassen sich dann nach der Natur und Elasticität des Stoffes und den Dimensionen der Röhre Töne wahrnehmen, die mit der Zu- und Abnahme der Stromstärke ebenfalls an Stärke zu- oder abnehmen.

Viertes Kapitel.

Witterungskunde.

24. Unter den verschiedenen Instrumenten, welche man speciell für die Witterungskunde ersonnen hat, und die zum Theil schon alten Datums sind, nehmen Barometer und Thermometer den ersten Platz ein. Der oben §. 5 detaillirte Versuch Toricelli's ist die Veranlassung zur Construction der Barometer geworden, von dem eine nähere Beschreibung hier um deßwillen überflüssig ist, weil der gewöhnliche Stuben- oder Phiolenbarometer hinlänglich genug bekannt ist. Für meteorologische Beobachtungen taugt dasselbe in dieser allgemein bekannten Form nicht, es soll für dieselben so fein gearbeitet sein, daß es noch Druckdifferenzen von $0^{mm},02$ angibt. Zu dem Ende hat der kürzere Schenkel an Stelle der Phiole keine Erweiterung, und als Höhe der in Frage stehenden Quecksilbersäule ist der Unterschied der Säulenhöhen in den beiden Schenkeln zu betrachten. Derselbe zeigt sich also veränderlich, und erfordert eine verschiebbare Scala, deren 0-Punkt dem Quecksilberstande in dem kürzern Schenkel entsprechend gestellt wird. Für Reisende, für Luft- und Schifffahrten ist das Aneroidbarometer anzuwenden, wenn es sich nicht um ganz genaue Angaben handelt. Dasselbe ist eine kreisrund gebogene, dünnwandige und flache Metallröhre, die luftleer gemacht ist, so daß der äußere Luftdruck stärker auf die innere concave als auf die äußere convexe Seite der Röhrenwandung drückt, was durch von ihren Enden ausgehende Metallfäden ver-

mittelst eines ungleicharmigen Hebelarmes auf einen Zeiger über-tragen werden kann, der über einem Zifferblatte sich drehend bewegt. — Reisebarometer von Gay-Lussac, von Bunsen; Pistors Barometer siehe Handwörterbuch der Physik und Chemie, Berlin bei Simion, Artikel Barometer. —

Eine mannichfaltigere Anwendung gestattet das Thermometer. Wir heben zunächst den Thermographen oder das Maximum- und Minimumthermometer hervor. Man denke sich zwei horizontal liegende Thermometer mit gesenkten kürzern und kugelförmig geschlossenen Schenkeln, von denen das eine mit Weingeist, das andere mit Quecksilber gefüllt ist. Vor dem Quecksilber liegt ein kurzes Metallstäbchen, welches beim Vorrücken desselben fortgeschoben wird, beim Zurücktreten aber liegen bleibt, so daß also für einen bestimmten Zeitraum der höchste Wärmegrad angegeben wird. Im Weingeistthermometer liegt ein kleines Stäbchen von Fischbein, über das der Weingeist im Falle der Ausdehnung hinaustritt; aber beim Zurückgehen wird in Folge der Adhäsion der Flüssigkeit an dem Fischbeinstoffe das Stäbchen mit zurückgezogen, so daß es anzeigt, welches der niedrigste Stand des Thermometers gewesen. Diese Einrichtung macht eine ununterbrochene Beobachtung unnöthig und registrirt demnach für gewisse festgesetzte Beobachtungstermine die höchsten und niedrigsten Werthe. Im Uebrigen werden an guten Instrumenten zu bestimmten Tageszeiten die Standpunkte beobachtet, notirt und der weiteren Berechnung unterzogen.

Wichtiger als der Thermograph sind die Differenzialthermometer, dem Namen nach zwei mit einander verbundene Thermometer, von denen das eine den Temperaturzustand der Luft, das andere einen erhöhten oder erniedrigten Stand anzeigt, so daß nun aus der Größe der Differenz die Ursache der Verschiedenheit der Größe und dem Ursprunge nach erschlossen werden kann. Leslie construirte so ein Aethrioscop, d. h. ein Instrument zum Messen der Heiterkeit des Himmels resp. seiner Wolkenlosigkeit, indem er einen parabolischen Spiegel der freien Atmosphäre zukehrte, und die eine Kugel eines Differenzialthermometers in den Brennpunkt des Spiegels brachte, während der andere mit Gold-

blattüberzug der freien Luft zugänglich war. In Folge der Wärmestrahlung sinkt das Quecksilber des ersten Thermometers um so mehr, je wolkenloser der Himmel ist, und der Unterschied beider Wärmemesser liefert geeignete Zahlen für diese Verhältnisse. Einem anderen Zwecke dient das zu einem Psychrometer gewordene Differenzialthermometer von August, bei dem die freie Kugel zur Bestimmung der Lufttemperatur dient, die andere aber mit Wasser benetzt wird, um die sogenannte Naßkälte anzuzeigen, d. h. die von der Temperatur und Dichte der Luft, wie von der Spannkraft der in der Luft bereits vorhandenen Wasserdämpfe abhängige Verdunstungskälte. Sie ist diejenige Temperatur, für welche die Luft mit den in ihr vorhandenen Dämpfen gesättigt ist.

Auf der Anwendung eines Thermometers basiren ferner das Herschel'sche Aktinometer und das Daniell'sche Hygrometer. Im ersten Instrumente, das die Intensität der Sonnenstrahlen angeben soll, haben wir nur ein Thermometerrohr mit Skala, einerseits auslaufend in eine Kugel mit einer kleinen Durchbohrung, um der Luft den Zutritt zu gestatten, andererseits in einen weitern gläsernen Cylinder überführend, der mit einer gefärbten Flüssigkeit gefüllt und mit einer Messingplatte geschlossen ist. Durch letztere läuft eine Schraube hindurch, welche einen Kolben trägt, so daß die Flüssigkeit im Cylinder der Höhe und Tiefe nach regulirt werden kann. Beim Gebrauche wird das Instrument in einem viereckigen Kasten mit einer gläsernen Wand den senkrechten Sonnenstrahlen ausgesetzt, und die Flüssigkeit so gehoben, daß sie an dem Nullpunkte des Skalenrohres angelangt ist. Die Skalentheile um welche sie nun unter Einwirkung der Sonnenstrahlen vorschreitet, geben das Maß der relativen Intensität dieser letztern an. — Das Daniell'sche Hygrometer besteht aus einer wagerechten Glasröhre mit zwei ungleich langen kugelförmig endenden Schenkeln. Im langen Schenkel ist ein kleines Thermometer aufgestellt, und seine Kugel wird von Schwefeläther umspült. Die andere Kugel des Instrumentes am kürzern Schenkel ist mit Musselin umwunden, der mit Schwefeläther übergossen eine Verdunstungskälte erregt, die das Thermometer sinken läßt, zugleich

aber auch auf der das Thermometer umgebenden Glaskugel an einem aufgeklebten Goldstreifen einen Niederschlag der in der umgebenden Luft enthaltenen Wasserdämpfe bewirkt. Der Mittelwerth der Temperaturen zwischen der, bei welcher der Thau eintritt, die am eingeschlossenen Thermometer abgelesen wird, und der bei welcher der Thau wieder verschwindet und die an einem andern freien Thermometer angezeigt wird, ist der sogenannte Thaupunkt; er gibt die relative Masse der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeitsmenge an, und ist demnach ein gründlicherer Wetterprophet als das Beschlagen kalter Gegenstände, wie eiserner Gefäße, und der Steine in den Fluren der Häuser und der Tennen, aus welchen Landleute Regen zu verkünden pflegen.

Anemometer oder Windmesser dienen in der Form der gewöhnlichen Wetterfahnen und Wetterhähne zur Bestimmung der Windrichtung, die jedoch nicht immer eine horizontale ist, und deßhalb durch diese Anzeigen nicht genau genug angegeben wird. Bessere Apparate gibt es für diese specielle Untersuchung nicht, wie viele Versuche man auch zur Auffindung genügender Instrumente gemacht hat. Will man die Stärke des Windes messen nach der Geschwindigkeit mit der er von Ort zu Ort fortschreitet, so nimmt man den Woltmann'schen Flügel in ähnlicher Einrichtung, wie er als Geschwindigkeitsmesser des fließenden Wassers dient. Windmühlenartige Flügel werden durch den Wind herumgedreht, und eine sich selbst registrirende Vorrichtung gibt die Zahl der Umdrehungen an, welche in einer bestimmten Zeit gemacht sind; der Schluß auf die Windgeschwindigkeit macht keine weitere Schwierigkeit. Andere Windmesser hat man vermittelst Pendelvorrichtungen construirt und durch Anschlagen einer dem Winde ausgesetzten Fläche gegen eine elastische Feder. Zweckmäßig scheint Lind's barometrischer Anemometer zu sein. An der Axe einer Windfahne ist ein barometrisch gebogenes Glasrohr angebracht, dessen längerer Schenkel mit einem kurzen wagerechten cylindrischen Fortsatze versehen und nicht verschlossen ist. Der kürzere Schenkel endigt ebenso nur mit einem weiten ohrförmigen Ansatze, um den Wind aufzufangen. Wenn nun die Röhre mit Wasser zum Theil angefüllt ist, so wird durch Windstöße die

gleiche Höhe desselben in beiden Röhrenschenkeln aufgehoben, und der Unterschied der Standpunkte, der an einer beigefügten skalenartigen Einrichtung abgelesen wird, gibt die Stärke des Windstromes an. Dieselbe muß schon ziemlich groß sein, um eine Hebung von 6—10^{mm} hervorzubringen.

Ein bekanntes meteorologisches Instrument ist ferner das Cyanometer von Saussure, darauf beruhend, daß die Bläue des Himmels in verschiedenen Nüancen auftritt, je nachdem die Luft mit mehr oder weniger Wasserdünsten angefüllt ist oder sich mehr und mehr trübt in dem Maße als der Wasserdampf sich zu Dünsten condensirt. Auf verschiedenen Papierfeldern sind aus Tusche und Berliner Blau gemengte Farben aufgetragen, die mit reinweiß als Nro. 1 beginnen und mit tiefschwarz als Nr. 53 schließen. Die Zubereitung und Mischung ist in der Weise bewirkt, daß Nr. 2 in einer gewissen Entfernung von 1, und Nr. 3 in derselben Entfernung von 2, gleich aussehen müssen als Nr. 1 respective Nr. 2 in unmittelbarer Nähe. Das Blau des Firmamentes wird nun mit einem solchen Farbenstreifen verglichen und daraus der Schluß auf die Beschaffenheit der Atmosphäre hergeleitet. — Schließlich gehört auch der Regenmesser zu den eigentlich meteorologischen Instrumenten. Die geeignetste Einrichtung desselben besteht in einem auffangenden quadratischen Gefäße, das konisch in ein zweites sonst verschlossenes Gefäß mündet; die Wasser der aufgefangenen Atmosphärilien werden im zweiten Gefäße vor dem Verdunsten geschützt, während eine communicirende Glasröhre ihren Stand daselbst nach außen markirt.

Außer den genannten Apparaten dienen zu den in Rede stehenden Untersuchungen noch Declinations- und Inclinationsnadeln, ferner Electroscope und Electrometer und Ozonometer, sowie akustische und optische Instrumente, um die Verbreitung des Schalles und die Durchsichtigkeit der Luft zu messen und wenigstens in allgemeinen Maßen festzustellen. Das Ozonometer ist ein durch Stärkekleister, dem einige Tropfen Jodkalium beigemengt wurden, hindurch gezogener Papierstreifen. Durch Ozon wird Jod in Freiheit gesetzt, was die Stärke tiefblau färbt, und so ist es möglich, den wechselnden Gehalt der Luft an Ozon nach-

zuweisen, damit aber auch zugleich ein Maß der atmosphärischen Electricität zu erhalten, weil diese den Sauerstoff der Luft in Ozon umwandelt.

25. Alle die genannten Apparate und Instrumente, welche zur Meteorologie gewissermaßen ausschließlich gehören, sind überholt und überflüssig gemacht durch den Meteorographen des Directors der römischen Sternwarte, Pater Secchi, von dem Paul Reis in seinem Lehrbuch der Physik eine Beschreibung gibt, die von den Abbildungen begleitet ist, welche der Erfinder selbst hergegeben hat. Wir lassen mit Erlaubniß des Verfassers die betreffende Stelle aus dem genannten Werke wörtlich folgen.

Der Meteorograph. (Secchi 1862—67). Fig. 1 und 6 stellen die vordere und hintere Front des Apparates dar, welcher die Wettererscheinungen graphisch auf 2 Tafeln schreibt, die von dem Uhrwerke auf dem Kopfe der Maschine herabgelassen werden, die eine in $2^1/_2$, die andere in 10 Tagen, und welche mit einem Coordinatennetze überzogen sind, dessen senkrechte Strecken die einzelnen Zeiten vorstellen, während die wagrechten Strecken die einzelnen Wettergrößen angeben. Die Schwankungen des Luftdruckes werden von Morland's Wagbarometer aufgezeichnet. In das gußeiserne, mit Quecksilber gefüllte Gefäß X taucht mit einer Holzflantsche Q das eiserne Barometerrohr B, das ebenfalls Quecksilber und das Toricelli'sche Vacuum enthält; wenn durch Erhöhung des Luftdruckes das Quecksilber in B steigt, so fällt es in X, das Rohr taucht weniger tief ein, verliert weniger von seinem Gewichte, wird dadurch schwerer und zieht stärker an dem Wagbalken JF; so wird dieser Wagbalken bei Veränderungen des Luftdruckes hin- und hergewiegt und mit ihm der lange, dreiseitige Hebel g k h, dessen unteres Ende wegen seiner Länge einen großen Bogen beschreibt, und demnach eine wagrechte Stange hin und her führt, deren Mitte durch den nach entgegengesetzter Richtung sich drehenden Hebel z eine wagrechte geradlinige Bewegung erhält; in der Mitte ist ein die Tafel berührender Stift befestigt, der vermöge seiner wagrechten hin- und hergehenden Bewegung auf die sich hebende Tafel die Luftdruckcurve H schreibt. — Die Temperatur wird durch ein Kreil'-

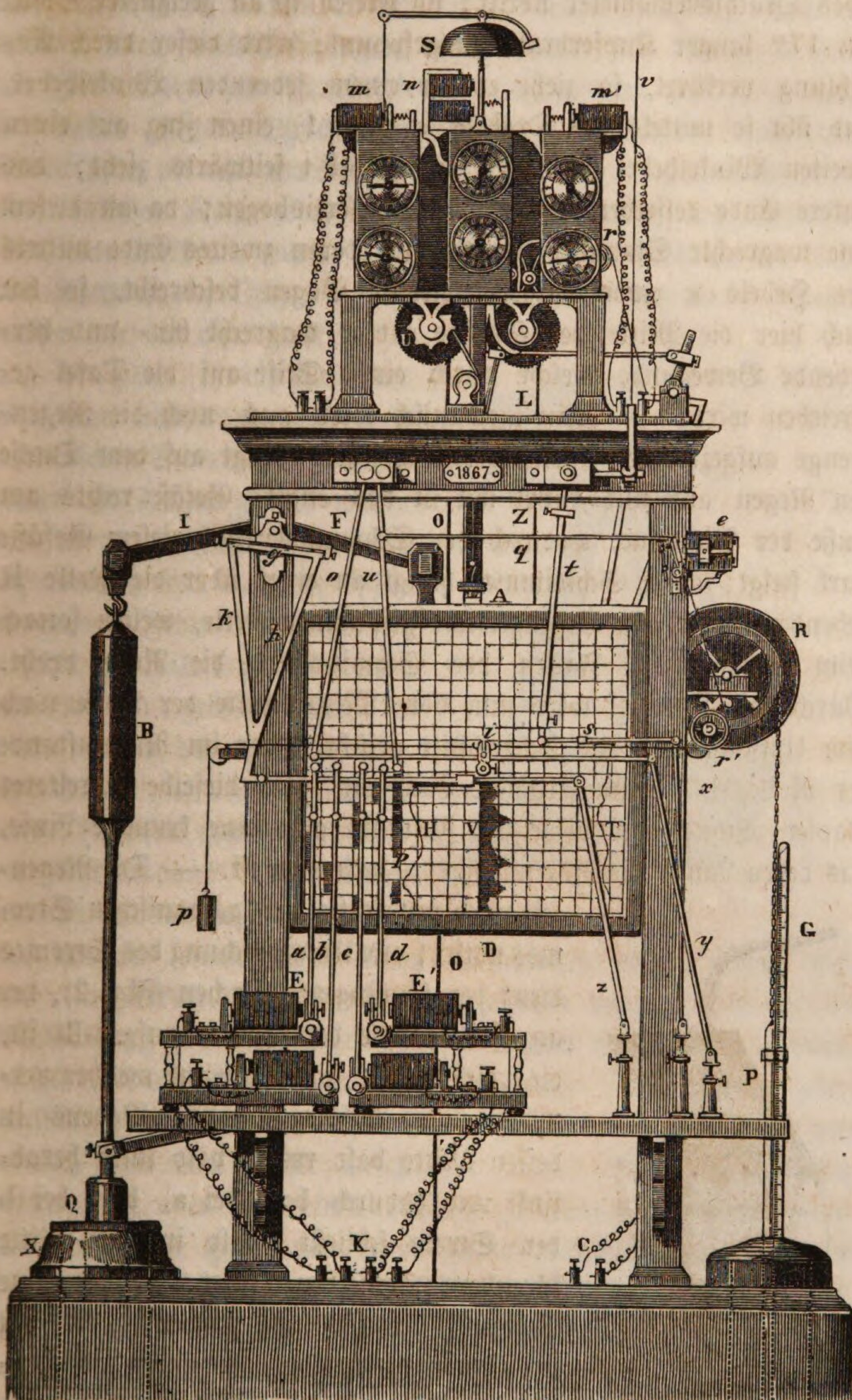

S
m
n
m'
v
r
U
L
1867
I
F
O
Z
e
q
t
o
u
A
k
h
R
B
i
s
r'
x
H
V
T
p
p
G
a
b
c
d
D
O
E
E'
y
z
P
Q
X
K
C

Fig. 1.

sches Draththermometer notirt; im Freien ist an geeigneter Stelle ein 17^m langer Kupferdraht ausgespannt; wird dieser durch Abkühlung verkürzt, so zieht er an einem federnden Winkelhebel, und übt so mittels des Drahtes v (Fig. 1) einen Zug auf einen zweiten Winkelhebel aus, der den Hebel t seitwärts zieht; das untere Ende desselben beschreibt einen Kreisbogen; da an diesem eine wagrechte Stange s befestigt ist, deren zweites Ende mittels des Hebels x einen entgegengesetzten Bogen beschreibt, so hat auch hier die Mitte der Stange s eine wagrecht hin- und hergehende Bewegung, welche durch einen Stift auf die Tafel geschrieben wird. — Rein mechanisch wird auch noch die Regenmenge aufgezeichnet. Ein weiter Trichter fängt auf dem Dache den Regen auf und führt ihn in das engere Gefäß rechts am Fuße der Maschine, wodurch der Schwimmer auf diesem Gefäße stark steigt; dieser Schwimmer hängt an einer über die Rolle R gehenden, durch ein Gegengewicht gespannten Kette, welche sonach beim Steigen und Fallen des Schwimmers die Rolle dreht. Durch das Uhrwerk wird nun vom Mittelpunkte der Rolle nach dem Umfange hin ein Schreibstift geführt, der im Ruhezustande der Rolle eine gerade, radiale Linie auf über dieselbe gebreitetes Papier zeichnet, im bewegten Zustande aber eine krumme Linie, aus deren Länge die Regenmenge zu erkennen ist. — Die Regenzeit wird mit Hülfe des galvanischen Stromes notirt; zur Unterbrechung des Stromes dient der schwingende Nachen (Fig. 2), der an einer Stelle des Daches aufgestellt ist, die rasch Regen sammelt, und welcher vermöge einer Aufbiegung des Bodens in dessen Mitte bald rechts bald links herabsinkt und dadurch bald bei a, bald bei b den Strom schließt, bald in der Mitte schwebend denselben öffnet, da der eine Poldrath zur Achse des Nachens geht. Ist der Strom geschlossen, so zieht das Hufeisen e (Fig. 1) einen Anker und mittels der Stange q einen Hebel seitwärts, der einen Schreibstift trägt



Fig. 2.

und daher einen kleinen Strich auf die Tafel zeichnet; wenn der Strom durch das Schwingen des Rachens sich öffnet, so wird der Hebel durch eine Feder wieder zurückgezogen, um gleich nachher einen gleichen Strich aufzuzeichnen; so entsteht eine kleine Strichsäule p, aus deren Länge die Regenzeit abgelesen wird. — In ähnlicher Weise wird auch die Windrichtung aufgeschrieben. Der eine Poldrath einer electrischen Batterie geht an die Achse der Wetterfahne (Fig 3), der andere theilt sich in 4 Zweige, welche um die vier Hufeisen E und E′ (Fig. 1) im Fuße der Maschine und dann an die 4 metallischen Sectoren der Grundplatte der Fahne gehen, welche von einander isolirt sind, und auf welchen eine von der Achse ausgehende Feder O schleift; da dieselbe der Fahne parallel steht und mit ihr gedreht wird, so wird je nach der Windrichtung der Strom in einem anderen der 4 Hufeisen geschlossen; dieses zieht alsdann seinen Anker und mit ihm den Hebel d (Fig. 1)

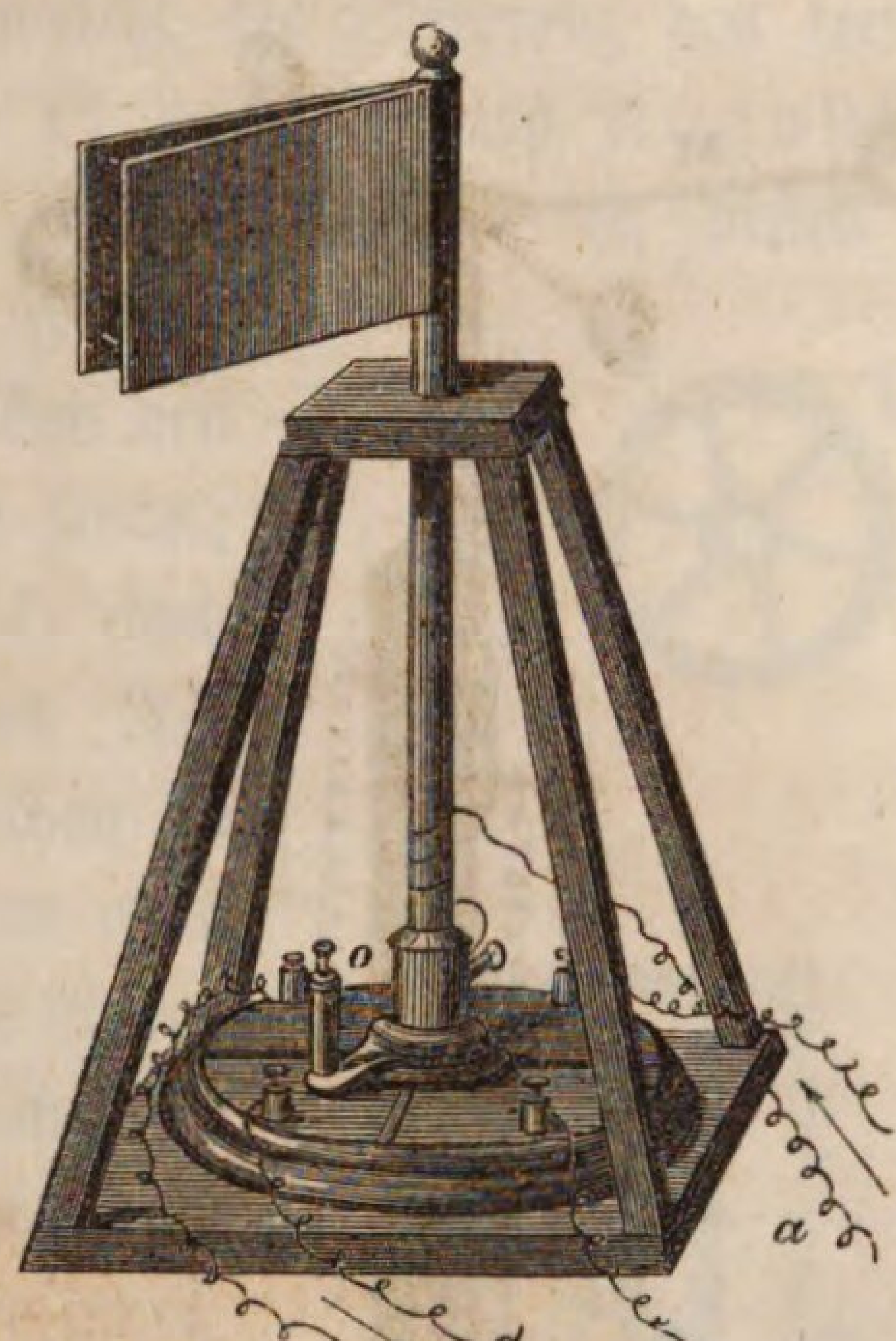


Fig. 3.

an, der an seinem Ende einen Schreibstift trägt, durch welchen ein Strich auf die Tafel gezeichnet wird. Nun ist die Drathleitung so eingerichtet, daß der Strom durch einen Schraubenstift auf den Anker und von diesem um das Hufeisen geht; folglich ist der Strom unterbrochen, so wie der Anker an- und dadurch von dem Stifte weggezogen wird. Mit dieser Unterbrechung ist aber auch die Anziehung zu Ende, und deßhalb werden Anker und Hebel von einer Feder zurückgezogen; hierdurch wird die Berührung mit dem Schraubenstifte wieder hergestellt, der Strom ist abermals geschlossen, der Anker wird wieder angezogen und ein zweiter Strich gezeichnet. So lange also die schleifende Fahnenfeder denselben Sector der Grundplatte berührt, so lange öffnet und schließt sich der Strom eines und desselben

Hufeisens selbstthätig, so lange macht also der Stift kleine Striche untereinander; es entsteht eine kleine Strichsäule, aus deren Länge die Dauer eines Windes zu erkennen ist; da durch jeden anderen der 4 Hauptwinde ein anderes Hufeisen in Thätigkeit gesetzt wird, und ein anderer der 4 Hebel a, b, c, d Striche zeichnet, so ist leicht die Windrichtung zu ersehen. — Für die Windstärke, als Anemometer wird Robinson's Schalenkreuz benutzt; dasselbe (Fig. 4) besteht aus 4 hohlen, offenen Halbkugeln von Messingblech, welche an den Enden eines horizontalen Stabkreuzes M so angebracht sind, daß sich ihre Höhlungen nach allen 4 Weltgegenden öffnen und sich auf der Spitze eines Thurmes durch den Wind um eine verticale Achse drehen, und zwar nach zahlreichen Beobachtungen mit dem 3ten Theile der Windgeschwindigkeit, so daß man aus der Zahl der Umdrehungen diese berechnen kann. Diese Zahl wird durch ein electrisches Zählwerk notirt. Der eine Poldrath a geht an die Achse des Kreuzes, der andere d an eine neben derselben sitzende Feder c, welche bei jeder Umdrehung einmal von einer Nase der Achse berührt wird, hierdurch den Strom für einen Moment schließt, und so das Hufeisen n (Fig. 1) für einen Moment magnetisch macht, wodurch der Anker bei jeder Umdrehung einmal angezogen und dann von einer Feder wieder zurückgeführt wird. Neben diesem Electromagnet n sitzt ein Uhrwerk, auf welches der Magnet als Regulator wirkt, und dessen Zeiger demnach die Zahl der Umdrehungen angibt. Doch wird die Windstärke auch graphisch dargestellt; eine Walze des Uhrwerkes wickelt nämlich eine Schnur auf, die über die Rollen r und r′ gehend den Stift i seitwärts zieht, der vermöge der Geradführnng o y

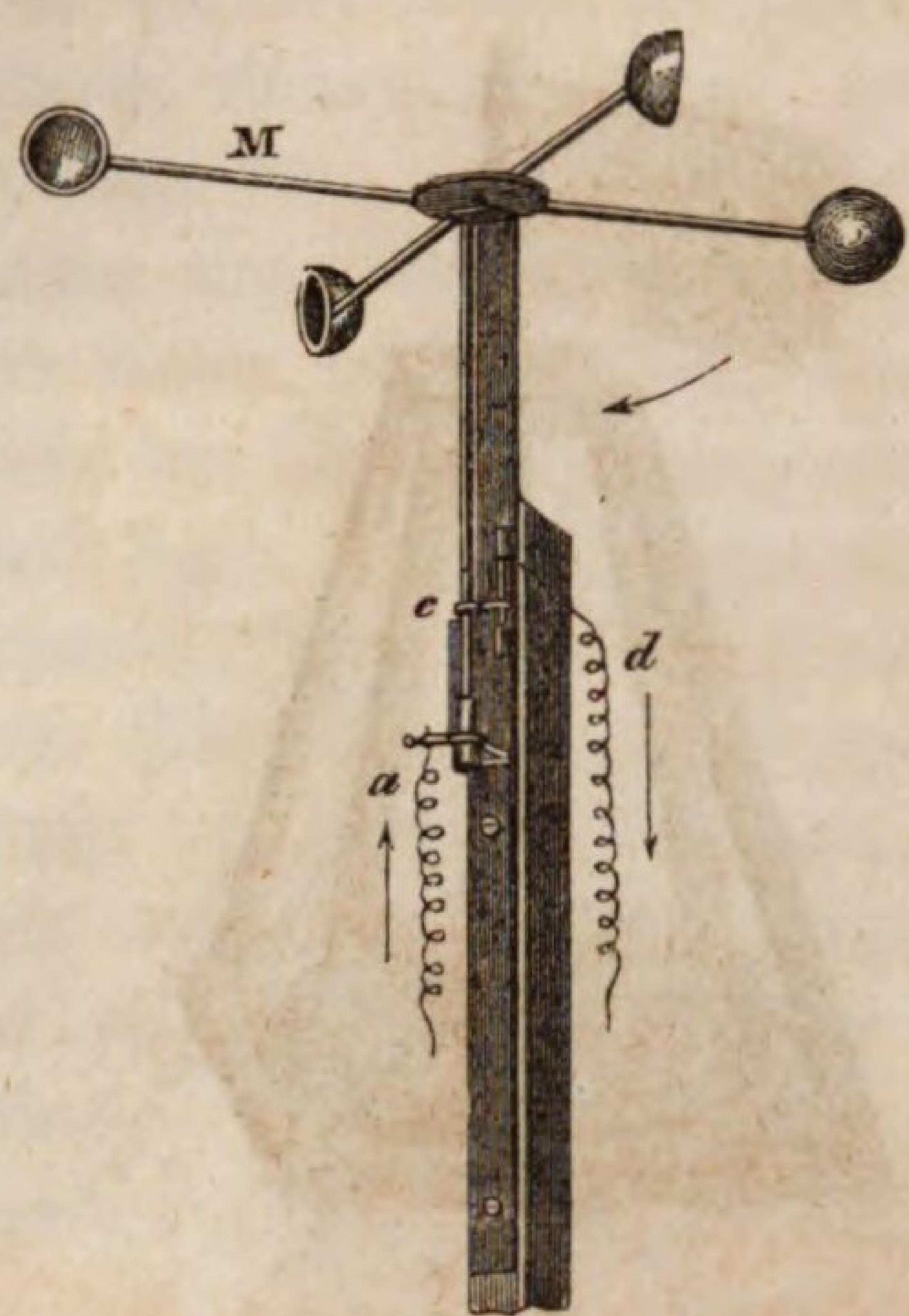


Fig. 4.

in jeder Stunde eine gerade Linie V beschreibt, die um so länger ist, je schneller das Uhrwerk läuft d. h. je schneller der Wind weht. Nach Ablauf einer Stunde wird jene Walze für einen Moment aus dem Uhrwerke geschaltet und der Stift i durch das Gegengewicht p zurückgeführt, um in der nächsten Stunde eine neue Linie zu ziehen, deren Länge die Geschwindigkeit des Windes ersehen läßt. — Am complicirtesten ist der Mechanismus für die Notirung der relativen Feuchtigkeit der Luft, welche ebenfalls als gerade Linie aufgezeichnet wird, welche die Differenz des feuchten und des trockenen Thermometers T' und T eines August'schen Psychrometers (Fig. 5) angibt. Alle Viertelstunden drückt eine excentrische Scheibe des Uhrwerkes (Fig. 6) auf den Hebel a und durch denselben den großen dreiseitigen Hebel W nach links; hierdurch geht auch der Faden L nach links und senkt so den Rahmen AB (Fig. 5) mit seinen 2 Platindräthen m und n in das Quecksilber der beiden oben offenen Thermometer. Durch diese Linksbewegung wird auch das Wägelchen x (Fig. 6) nach links gezogen, auf welchem sich ein Morse'scher Telegraph befindet, ein Hufeisen mit Anker und Ankerhebel, dessen Schreibstift indessen gewöhnlich das Papier nicht berührt. Der Drath dieses Hufeisens kommt aber nicht direct von dem positiven Pole der Batterie, sondern geht vorher über den Anker und den Schraubenstift des Relais M, und nachher in die Kugel des trockenen Thermometers, während der negative Poldrath mit dem Platindrath n dieses Thermometers verbunden und demnach beim Eintauchen von n der Strom geschlossen ist. Der positive Poldrath einer zweiten Batterie geht um das Hufeisen des Relais M und von da in die Kugel des nassen Thermometers, während der negative Drath

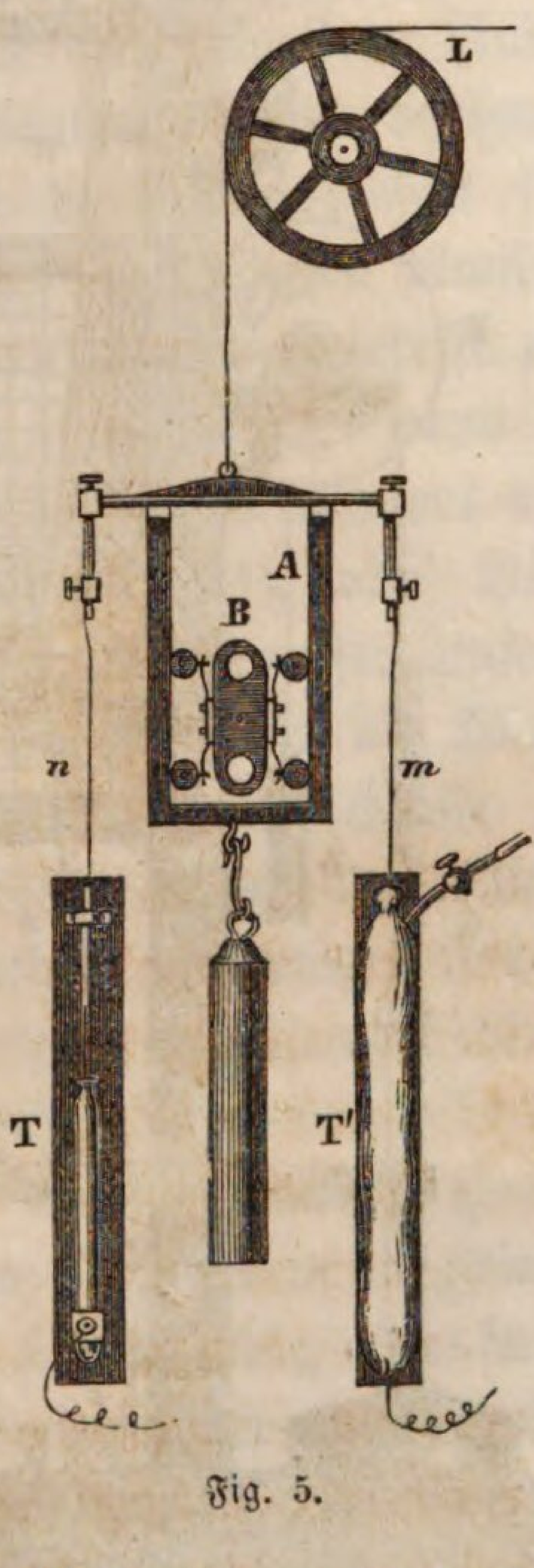


Fig. 5.

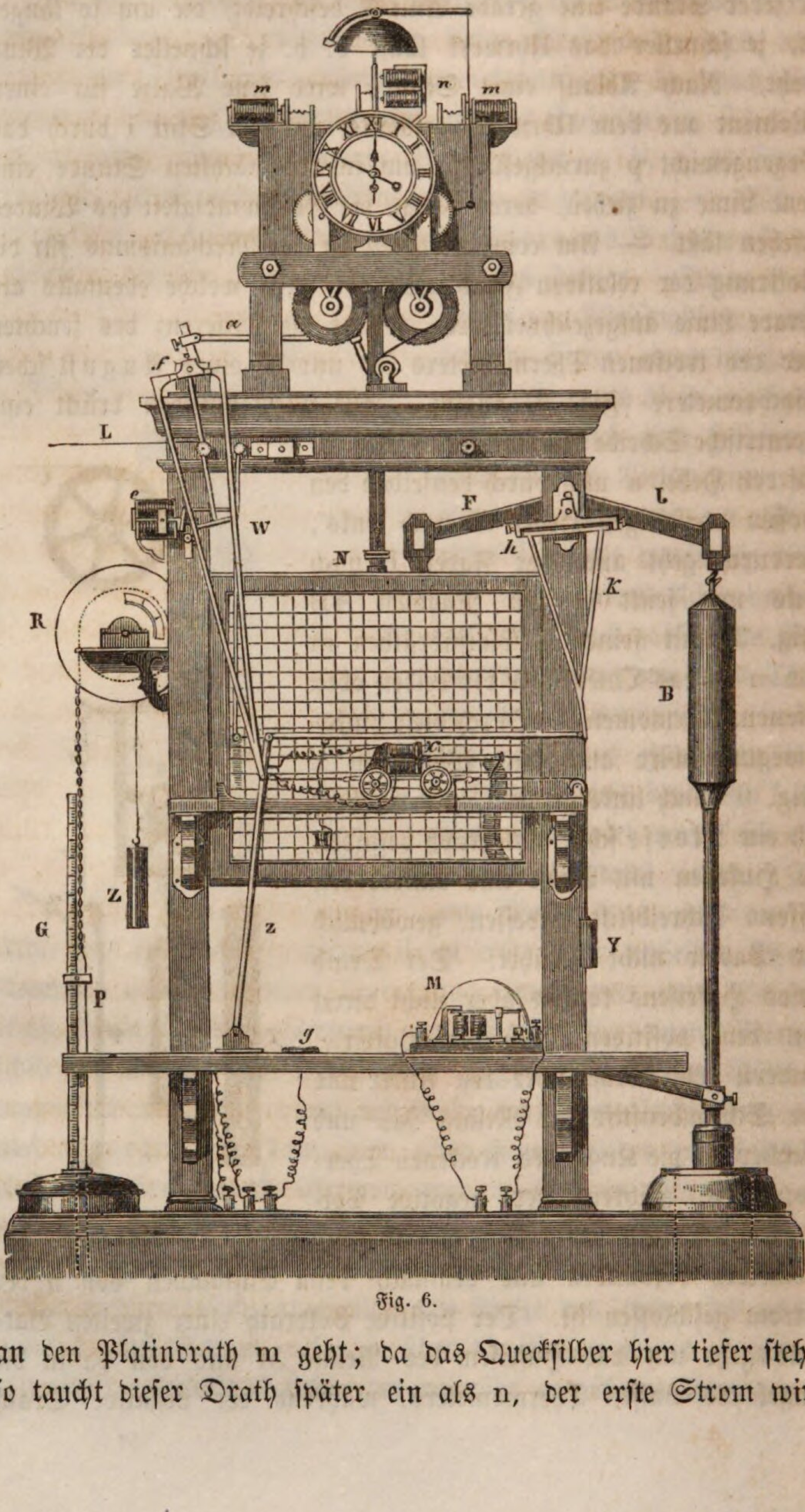


Fig. 6.

an den Platindrath m geht; da das Quecksilber hier tiefer steht, so taucht dieser Drath später ein als n, der erste Strom wird

eher geschlossen als der zweite. Bei dieser Schließung, also im Moment des Eintauchens von n wird der Morse'sche Telegraph in Bewegung gesetzt und drückt seinen Stift auf das Papier, während dieser Apparat mit seinem Wägelchen die Linksbewegung des großen Hebels theilt und dadurch eine wagrechte Linie auf die Tafel zeichnet; diese ist zu Ende, wie m in das nasse Thermometer taucht; denn in diesem Augenblicke wird der Strom des Relais M geschlossen und der Anker desselben von seinem Stifte abgezogen; sowie aber diese Berührung aufhört, ist der erste Strom geöffnet, der Morse'sche Telegraph arbeitet nicht mehr, die gerade Linie ist zu Ende; folglich gibt die Länge dieser geraden Linie den Thermometerunterschied und mit diesem den Grad der Feuchtigkeit zu erkennen. — Für alle diese einzelnen Linien müssen bei jedem Apparate erst die constanten Größen bestimmt werden, durch deren Multiplication mit den Liniengrößen sich dann die einzelnen Wettergrößen ergeben. — Dieser römische sowie der schweizer Meteorograph erweckten großes Interesse auf der Weltausstellung von 1867 in Paris, und können, wenn sie sich bewähren, für eine zukünftige Erkenntniß des Wetters von großer Wichtigkeit sein. Der Meteorologe Wild von Bern sagt: „Die selbstregistrirenden Wind- und Regenmesser unserer Sternwarte haben in den zwei letzten Jahren über die Wind- und Regenverhältnisse Bern's viel vollständigere Aufschlüsse gegeben, als 20jährige in gewöhnlicher Weise angestellte frühere Beobachtungen. Wir können demnach hoffen, in wenigen Jahren auch die Erforschung unseres Klimas zu einem gewissen Abschlusse gebracht zu haben." Wild hat nämlich schon von 1861—64 auf der Berner Sternwarte allmälig durch den Mechaniker Hasler einen Meteorograph zusammenstellen lassen, in welchem die Zeichen auf eine für ein Jahr ausreichende und sich allmälig abwickelnde Rolle von Papier ohne Ende gemacht werden, und zwar in Gestalt von Punkten. Die Stifte werden nach je 10 Minuten auf das Papier gedrückt, erzeugen je einen Punkt und heben sich dann wieder, worauf das Papier um eine kleine Strecke verschoben wird; die zusammengehörigen Punkte bilden eine Curve, aus deren Verlaufe auf dem Coordinatennetze der Verlauf der einzel-

nen Wettererscheinungen erkannt wird. Auch in den einzelnen Apparaten weicht Wild's Meteorograph von dem Secchi's ab; so wird für die Temperatur ein Messing-Stahl-Thermometer, für die Feuchtigkeit ein Haar-Hygrometer mit Achse und Zeiger von Aluminium verwendet.

26. Die bedeutendste Einwirkung der Wärme auf Natur und Beschaffenheit des Klimas besteht in der Erregung von Luft- und Meeresströmungen. Schon in einem geheizten Zimmer kann man an einer nur wenig geöffneten Thür eine doppelte Strömung wahrnehmen; in der untern Hälfte sieht man in die Spalte kalte Luft hineindringen, weil eine daselbst aufgestellte Flamme sich nach innen wendet, während oberhalb der Spaltenmitte die Spitze der Flamme sich nach außen kehrt, zum Zeichen, daß hier ein entgegengesetzter, natürlich warmer Luftstrom aus dem Zimmer herausströmt. Aehnliches findet an Seeküsten statt. Mit dem Aufgange der Sonne erwärmt sich das feste Land leichter und früher als das Meer, die über dem Lande lagernde Luft wird erwärmt, strömt sich ausdehnend nach oben, und kann nun durch einen kalten Luftstrom vom Meere her ersetzt werden, während oben in der Höhe die warme Luft nach dem Meere hin abströmt. Man spricht also am Morgen auf der Küste vom Seewinde. Am Abend tritt das Umgekehrte ein; das Land kühlt sich rasch ab, die Meerwasser halten die Wärme länger, es entsteht nun ein unterer vom Lande her nach dem Meere wehender Wind und ein oberer Luftstrom, der dem Lande zugekehrt ist; der Küstenbewohner spricht von Landwind. Zwischen beiden Stationen liegen oftmals heftige Erschütterungen des Gleichgewichtes der Luft, wenn der sich senkende warme Luftstrom und der sich hebende kalte die gegenseitige Ausgleichung nicht friedlich vollziehen, immer aber einige Stunden Windstille nach der Zeit, wo auch das Meer seine höchste Tagestemperatur gewonnen hat.

Derselbe fast regelmäßige Verlauf für das Stattfinden zweier Luftströmungen in entgegengesetzter Richtung in den untern und obern Regionen der Atmosphäre, so wie das allmälige Aufsteigen des untern und das Niedersinken des obern Stromes, ein kurzer Kampf bei dem Zusammentreffen beider, sodann die gewechselte

Lage derselben, wodurch der untere zum obern und umgekehrt wird, alles das sind natürliche Folgen der Lage der Erde gegen die Sonne und ihrer verschiedenen Erwärmung an verschiedenen Orten durch das Tagesgestirn. Es kommen jedoch noch sehr beachtungswerthe Momente in Betracht. Während nämlich der Nordstrom von den Polen her sich allmälig Punkten der Erde nähert, deren Bewegung eine raschere ist als die war, woher er entsprungen, geht die direkte nördliche Richtung des Stromes in eine mehr und mehr östliche über, weil die Atmosphäre ihres loseren Zusammenhanges halber nicht der festen Erdrinde in der schnelleren Bewegung Folge leistet und wegen der Axendrehung von West nach Ost zurückbleibt, und nun als von Osten kommend uns entgegentritt. Dasselbe findet statt bei dem in den obern Regionen herrschenden Aequatorialstrome, der in Folge der Axendrehung allmälig aus einem Südwind, ein Süd-West- ja ein Westwind wird. Hinzu treten das Aufsteigen des Nordstromes, und das Sinken des Südstromes, der Kampf beider Ströme zur Zeit der Aequinoctien, woher die Aequinoctialstürme ihren Namen tragen, und vielfache locale Abänderungen die im Einzelnen verfolgt werden müssen. In der heißen Zone sind die Verhältnisse am klarsten. Hier muß in Folge der mehr oder minder scheitelrecht gerichteten Sonnenstrahlen ein gerade in die Höhe steigender Luftstrom entstehen, und durch einen Polarstrom der Luftverlust ersetzt werden, also weht fast beständig das ganze Jahr hindurch auf der nördlichen Halbkugel, vorzüglich im stillen Ocean bis zum 29° NB., ein Nordostpassatwind, während auf der südlichen Erdhälfte ein Südostpassat sich findet, der jedoch nur bis zum 25° SB. reicht. Im indischen Ocean dagegen, wo in der Vertheilung Land und Meer sich mehr das Gleichgewicht halten, entstehen die sogenannten Monssuns, die mit Land- und Seewinden große Aehnlichkeit haben. Sie herrschen als Seewind aus Südosten vom April bis zum October, als nordwestlicher Landwind in den übrigen Monaten des Jahres. Zwischen dem Nordostpassat der nördlichen und dem Südostpassat der südlichen Halbkugel muß zu beiden Seiten des Aequators bald hier mehr nordwärts bald dort mehr südwärts hin oscillirend, eine Region der Windstillen

oder der Kalmen existiren, indem der beiderseitige Druck der Passate durch den senkrecht aufsteigenden Luftstrom, der oben als Aequatorialstrom abgleitet, zum Stillstande gebracht wird. In den Anden ist der Aequatorialstrom in einer Höhe von 20000 Fuß anzutreffen, auf Teneriffa ist derselbe nur noch 3000 Fuß hoch und in Europa erreicht er die Thalsohlen uud wird der herrschende Wind an der Oberfläche. Deshalb gestaltet sich in unserem Theile der gemäßigten Zone der Lauf eines Jahres in Bezug auf die an der Oberfläche herrschenden Winde also: Im Winter und Frühjahr kommt der Nordwind und geht allmälig durch Nord-Ost zu einem Ostwind über, wird auch durch die Berührung mit dem obern Strome zu einem Südost- und Südwinde; und während dann allmälig mit dem fortschreitenden Jahre der Aequatorialstrom an die Oberfläche gelangt, geht derselbe nun durch Südwest in einen Westwind über und in Folge der Einwirkung des Nordstromes auch in einen Nordwest. So muß sich im Laufe eines Jahres die Windfahne drehen aus Nord durch Ost, Süd und West wieder zum Norden und wenn sich das auch nicht buchstäblich erfüllt, so hat doch die Windfahne diese Tendenz d. h. in den verschiedenen Zeiten des Jahres gibt es herrschende Winde, die dem oben ausgesprochenen Gesetze gemäß aufzufinden sind, sofern nicht locale Einflüsse in ganz bestimmter Weise eine Abänderung bedingen. Wenn das durchgeführte Drehungsgesetz also nicht ganz zur Erscheinung kommt, so herrscht dasselbe doch im Mittel, und zwar öfters unter vielfachem Zurückspringen, was zwischen Nord und Ost sowie Süd und West häufiger als an andern Stellen der Windrose zu bemerken ist. Auch das ist noch zu beachten, daß ein stetiges Durchlaufen der Windrose im Sinne des Drehungsgesetzes constante Witterung, ein heftiges Schwanken des Wetterhahnes und ein Vor- und Zurückspringen desselben Sturm und unbeständiges Wetter andeutet. Wenn ein fortschreitender Wind irgend ein Hinderniß trifft, so wird er in seiner Bewegung nicht nur gehemmt, es entstehen auch Wirbelströmungen, die nach Ursache und Größe der Veranlassung von ungeheuren mechanischen Zerstörungen begleitet sein können. Die Geschwindigkeit des Windes wechselt

zwischen 1 und 40 Meter pro Secunde; mäßig nennen wir den Wind, der höchstens 3 Meter fortschreitet, Sturm wenn er eine Geschwindigkeit von 20 bis 30 Meter gewinnt und Orkan wenn er diese Grenze noch überschreitet und sich bis zu 40 Meter Geschwindigkeit steigert. Die heftigsten Stürme beginnen meistens in der Gegend der Antillen, wenden sich dann dem nordwestlichen Florida zu, folgen dem Laufe des Golfstromes und kommen endlich an die europäische Küste. Aehnliche Erscheinungen weist der bengalische Meerbusen auf, nicht minder das chinesische Meer. Die Region der Kalmen hat ebenfalls heftige Stürme und mit Gewittern begleitete Orkane, woher sich der Ausdruck der deutschen Matrosen „die Regen- und Donnersee" schreibt. Dove, der Entdecker des Drehungsgesetzes hat durch unablässige Untersuchungen, die man bei ihm selbst nachlesen muß, diesen Theil der Klimatologie zu einer wissenschaftlichen Höhe geführt, die wohl noch durch fernere Untersuchungen gefördert und im Einzeln durch Berichtigung von localen Anschauungen gehoben und erweitert werden kann, sonst aber als wohlgefügtes Gebäude in Anlage und Ausführung fertig dasteht. Wenige Stellen der Wissenschaft sind so sicher gegründet wie diese.

27. Schon die den Luftströmungen analogen Meeresströmungen sind in der Begründung ihres Ursprunges viel weniger sicher erkannt. Daß die ungleichen Temperaturverhältnisse auf der Erde den vorzüglichsten Grund für sie abgeben, ist wohl für Jedermann klar, aber Anfang und Verlauf lassen sich nicht in einfachen Anschauungen wie vorhin zusammenfassen. Das Wasser der Tropen weicht wegen des ungleichen Gewichtes den Wassern aus den Polarmeeren, die in der Tiefe sich nach Süden bewegen, während jene nach Norden hin abgleitend noch in dieser Weise die nördlichen resp. südlichen Erdländer auf der andern Hemisphäre bewohnbar machen. Man fügt noch hinzu den ungleichen Salzgehalt, der durch die Verdunstung in den heißen Weltgegenden sich gegen die Nordmeere allzusehr hebe und deshalb eine Ausgleichung durch Meeresströmungen erfordere. Auch die Axendrehung der Erde wirkt in gewisser Weise ein, ursprünglich bestimmend oder abändernd. Guthes Geographie, (Hannover,

Hahn'sche Bchh.), beiläufig gesagt vielleicht die beste kleinere Arbeit über diese Wissenschaft, entwirft eine recht zutreffende Schilderung über die Meeresströmungen und einige andere klimatologische Beziehungen, und wir dürfen an dieser Stelle von den entsprechenden Auseinandersetzungen Gebrauch machen, ohne unsern Zwecken untreu zu werden.

Im atlantischen Oceane geht eine mäßig starke Strömung von dem Meerbusen von Guinea dem Aequator parallel laufend zur Ostspitze Südamerikas beim Cap Roque um sich hier in zwei Arme zu theilen, von denen der eine die Küsten Amerikas verfolgend bei Trinidad in das amerikanische Mittelmeer eintritt, und längs den Ufern bis zur Missisipimündung strömt. Hier nimmt nun die Strömung den Namen des Golfstromes an, geht um die Küsten von Florida herum uud tritt nach den sogenannten „Engen" in den nördlichen atlantischen Ocean ein. Hier wo die Breite des Stromes kaum 40 Meilen beträgt, sollen die Wasser mit einer Geschwindigkeit von 72 Meilen in 24 Stunden nach Norden hin fortströmen, dann aber wenden sie sich verbreiternd und verlangsamend über Cap Hatteras hinaus in der Breite von Newyork in östlicher Richtung der europäischen Küste zu. Ihre nördlichen Ausläufer erreichen Island, Spitzbergen, Jan Meyen und die Küsten Norwegens, ihre südlichen England und die Wasser der Nordsee und des Canals. Das absonderliche Klima Englands, das grüne Irland sind laute Zeugnisse für die mildernde klimatische Einwirkung der warmen Aequatorialwasser in den nördlichen Breiten; die westlichen Häfen Norwegens frieren bis zum Nordcap hinauf niemals zu. Ein großer Theil der Wasser kehrt über die Azoren und canarischen Inseln zur Ursprungsstelle des Kreislaufes zurück. Die auf solche Weise begrenzte Meeresfläche ist eine großes Gebiet von fast 65000 Meilen, das auf seiner sehr ruhigen Oberfläche eine Seetangwiese bildet, indem diese Meerespflanze von den Rändern des Golfstromes aus in die Mitte des Wirbels hier zusammengetrieben wird. Die hier erwähnte sogenannte Sargasso-Wiese besteht hauptsächlich aus zwei Theilen, der Bank von Corvo und der Bank von Bermudas, die beide nur durch einen

schmalen Streifen mit einander verbunden sind. In den niedern Breiten ist der Golfstrom vorzugsweise an dem hellblauen Wasser kenntlich, was sich scharf gegen die Ränder absetzt, sowie an den diese Ränder begleitenden Meerespflanzen. Dem Golfstrom entgegen tritt die Polarströmung, die seine östliche Ablenkung nach Europa hin bedingt, und am Punkte des Zusammenstoßes mit ihm in der Gegend von Newfoundland das Meer weithin mit Nebeln bedeckt. Unterhalb dieses Zusammentritts fährt der Nordstrom als submarine Strömung nach Süden hin, um hier das allzu heiße Klima in entgegengesetzter Weise zu mildern, wie es der Golfstrom auf Spitzbergen und an den norwegischen Küsten gethan hat. An den Orten des Zusammentreffens beider Ströme sind die gegenseitigen Temperaturen 16 und 6 Grad. Der Polarströmung folgt eine unendliche Schaar von Fischen, denen die Wasser des Golfstromes nicht zusagen, daher sind die Gegenden Newfoundlands die unerschöpflichen und ewig sich erneuernden Fischgründe, die namentlich durch den Fang des Kabliaus die Cultur Europas nicht weniger bedingen als der Heringsfang und der Anbau der Kartoffel.

Der zweite Arm der Aequatorialströmung verfolgt ganz genau die amerikanische Küste bis zur Mündung des La Plata, wendet sich dann als südatlantische Verbindungsströmung ostwärts zur Südspitze von Afrika und von da ab zum Meerbusen von Guinea, so daß also auch auf der südlichen Halbkugel die Gewässer des atlantischen Oceanes einen ähnlichen Kreislauf beschreiben, wie es auf der nördlichen der Fall ist. Im großen Ocean strömt aus der Gegend des Polareises zwischen 160° und 100° W. L. die antarktische Polarströmung gegen die Westküste Südamerikas und theilt sich auf dem Parallel von Chiloe in einen südlichen Arm, der als Cap-Horn-Strom um die Südspitze des Continents biegt und in die südatlantische Verbindungsströmung sich ergißt, und in einen nördlich gewendeten Arm, die Humboldtsströmung, die die Temperatur der Küste bis nach Peru hin herabdrückt. Zwischen den Wendekreisen strömt ein breiter, in der Mitte durch eine Gegenströmung unterbrochener Strom als nord- und südäquatorialer Driftstrom westwärts nach Austra-

lien und zur hinterindischen Inselwelt. Bei letzterer beginnt eine nordwestwärts gehende Strömung, die dem Golfstrome im atlantischen Ocean entspricht. Es ist der Kuro-Siwo der Japaner, der den äußersten Saum der ostasiatischen Küstenstrecke, und die Kette der Aleuten nicht zu durchbrechen vermag, vielmehr an den Küsten von Nordamerika umbiegt und diese bis zu den Galopagos-Inseln verfolgt, um sich dann wieder mit der Aequatorial-Driftströmung zu vereinigen. Auch ihm tritt aus der Behringsstraße eine Polarströmung entgegen, die sich in dem Behringsmeere ausbreitet, und dann zwischen dem Kuro-Siwo und den Küsten Asiens hindurch nach Süden verläuft. Nebel und häufige Niederschläge bezeichnen auch hier den Lauf der Strömungen. Im indischen Ocean kennt man eine Fortsetzuug der südatlantischen Verbindungsströmung, welche südlich vom Cap ostwärts bis nach Tasmanien läuft, und eine zweite, welche von den Küsten Vorderindiens bis zur Ostküste Afrikas geht, und in reißendem Laufe durch den Canal von Mozambique strömend, das Cap erreicht, welches sie unter dem Namen der Lagullusströmung umwandert.

28. Einige neuere Untersuchungen aus der Tiefsee sind auf den englischen Schiffen Lightning, Porcupine und Shearwater in den Jahren 1868, 69, 70 und 71 von Carpenter, Thomson, Duncan und Jeffrey angestellt in der Nähe der Faröern und den nördlichen Meeren sowie im Süden Europas bei Gibraltar und im Mittelmeere einerseits, wie andernseits an den portugisischen Küsten. Man fand in $59\frac{1}{2}^0$ N. B. und $9\frac{1}{4}^0$ W. L. bei einer Oberflächentemperatur von $11\frac{1}{2}^0$ bei 50, 250, 400, 500 und 767 Faden Tiefe die respectiven Temperaturen von 9, 8.7, 7.8, 7.3, und 5.4; dagegen zeigten in $60\frac{1}{2}^0$ N. B. und $8\frac{1}{4}^0$ W. L. bei $11\frac{1}{4}^0$ Oberflächentemperatur 50, 250 und 384 Faden Tiefe bezugsweise die Temperaturen 9.3, 3.5 und — 0.75, so daß hier eine 2000 Fuß mächtige Schicht Wasser unter Null Grad den Meeresboden bedeckt. In der Mitte zwischen den Faröer- und Shettland-Inseln war bei 400 Faden die Temperatur von — 0.5 und nahm bis 640 Faden noch ab auf — 1,33.

Die Hauptresultate von 1870 und 71 lassen sich in An-

sehung der Temperaturverhältnisse sehr einfach zusammenfassen in den Ausdruck eines zwischen dem atlantischen Ocean und dem Mittelmeer stattfindenden Gegensatzes. Im letztern fand man von der Tiefe von 100 Faden abwärts, also von der Oberflächenschichte abgesehen, bis zur Tiefe von 1500 Faden die Temperatur fast constant 12.5, so daß die Tiefe an sich die Temperatur gar nicht ändert. Dagegen fand man im Tiefseebett des nordatlantischen Oceans überall die kalte Schicht auf dem Boden; z. B. erhielt man bei der zweiten Fahrt von 1869 unter 47,5⁰ N. B. und 11,5⁰ W. L. bei der Oberflächentemperatur von 18⁰ in den Tiefen von 250, 500, 1000 und 2000 Faden die Temperaturen von 10, 8.6, 3.5, 2.4 und in der Breite von Lissabon war dieselbe bestimmte Trennung zwischen der obern warmen und der untern kalten Schicht durch eine Schicht der raschen Temperaturabnahme, in welcher die Mischung der beiden Ströme erfolgt, zwischen 800 und 1000 Faden Tiefe. So tief liegt hier dieselbe Schicht, die im Lightning-Canal (eine Meeresschlucht in der Nähe der Faröern) zwischen 150 und 300 Faden liegt. Die Schicht des untern kalten Wassers dringt mit dem Boden höher herauf an die Oberfläche.

Derselbe Gegensatz wie zwischen Mittelmeer und atlantischem Ocean findet auch unter ähnlichen Verhältnissen zwischen andern Meeren Statt, so zwischen dem rothen Meer und dem arabischen Meerbusen, denn jenes zeigt im Golf von Suez von der Oberfläche bis zu dem in 450 Faden liegenden Boden fast gleichmäßig die Temperatur von 21.5 und in seinem südlichern Theile selbst noch bei 1000 Faden Tiefe noch die Oberflächentemperatur von 13.8; in letzterem aber hat man bei 2000 Faden weniger als 2,25⁰ angetroffen. Aehnlich ebenso und höchst bezeichnend zwischen dem chinesischen Meere und der von einem dichten Klippenwall und den philippinischen Inseln, den Suluh-Inseln und der Nordküste von Borneo umschlossenen Suluh-See; in jenem nimmt die Temperatur in der Schicht von 200 bis 550 Faden Tiefe ab von 10.5 bis auf 2.7 und bleibt dann bis zum Boden in 1550 Faden Tiefe unverändert d. h. unter der tropischen See liegt eine 6000 Fuß mächtige Schicht kalten Wassers, in der

Suluh-See fand man zwischen 200 und 300 Faden Tiefe die Temperaturabnahme von 13 auf 10° und von da ab bis zur Tiefe von 1200 Faden war die Temperatur constant. Man sieht, in dem offenen Ocean wird die Temperatur der untern Schicht von der Oberflächentemperatur nicht bedingt; sie ist unter allen Graden fast die gleiche, nahe dem Nullpunkt. In den abgeschlossenen Seebecken erscheint dagegen die ganze Tiefe bis zum Boden gleichmäßig und constant erwärmt, wenn man die Oberflächentemperatur ausschließt, die noch vom Jahreszeitenwechsel beeinflußt wird.

Man ist zu dem Schlusse gedrängt, daß die im offenen Ocean überall angetroffenen Schichten warmen Oberflächen- und kalten Grundwassers aus verschiedenen Quellen stammen, von denen sie durch die allgemeine oceanische Circulation zu den Beobachtungsorten hingeführt werden. Die einfachsten physikalischen Thatsachen bedingen diese Circulation; das in den Polargegenden erkaltete Wasser sinkt unter und bewegt sich in der Tiefe des Meeres gegen den Aequator zurück, um das von da abfließende und das durch die Verdunstung in Wolkenform nach höhern Breiten geführte Wasser zu ersetzen. Das Mittelmeer, das rothe Meer und, wenn auch in nicht gleich vollständiger Weise, die Suluhsee sind von dieser allgemeinen Circulation ausgeschlossen. Die Vergleichung der mittlern Jahrestemperatur der Luft über diesen Seebetten zeigt, daß die tiefe Schicht des Mittelmeeres und des rothen Meeres um etwa 5° kälter ist als die Luft im Jahresmittel, indeß in der wieder vollkommen abgeschlossenen Suluhsee diese Differenz auf 17° steigt, ganz wie es erwartet werden mußte.

Durch die Untersuchungen aus den Jahren 1870 und 71 ist die interessante Frage von den Bewegungen des Meeres in der Gibraltarstraße klar entschieden worden. Die Tiefenmessungen weisen nach, daß zwischen Cap Trafalgar und Cap Spartel eine submarine Wasserscheide von Nord nach Süd herübergeht, ein Höhenzug im Meeresgrunde, der im Norden bis auf 50, im Süden auf 150 Faden mittlere Tiefe heraufsteigt, daß 45 Meilen westlich von demselben und ebenso östlich in der Axe der

35 Meilen langen Straße von Gibraltar der Meeresboden auf 500 Faden herabsinkt, daß die Straße selbst zum Mittelmeer gerechnet werden muß. Mit einer Hebung des Meeresgrundes um nur 200 Faden würde jener Höhenzug zum Festlande, das Mittelmeerbecken würde vom atlantischen Ocean abgetrennt, und die Straße würde sich ganz mit dem dichtern Wasser des Mittelmeeres ausfüllen, indeß jetzt das Wasser der obern Schicht ganz den Charakter des atlantischen und das der untern Schicht den des Mittelmeeres zeigt. Der durch den Salzgehalt bedingte Unterschied der specifischen Gewichte zeigt dieses sehr deutlich an. Im atlantischen Ocean findet man an der Oberfläche das specifische Gewicht 1,0269, auf dem Grunde 1,0261; der Straße von Gibraltar gegenüber fand man 45 Meilen westsüdwestlich von Cap St. Vincent oben 1,0268 und unten 1,0281, also bereits die schwerern Wasser des Mittelmeeres sehr merkbar; man fand zugleich die Erwartung bestätigt, daß das schwere Wasser sich nach der tiefern Stelle hin sammeln werde, indem man in der Nähe der nach Süden fallenden Wasserscheide beobachtete.

Es fließt also in der Tiefe Wasser aus dem Mittelmeer über die Wasserscheide in den Ocean. Jenseits der Wasserscheide fand man ihr ganz nahe bei einer Tiefe von 125 Faden die specifischen Gewichte von 1,0241 und 1,0292 und näher, daß die ganze Schicht unter 110 Faden Tiefe das specifische Gewicht von 1,0290 erreichte. Man sieht, an der Oberfläche fließt das Wasser aus dem Ocean in das Mittelmerr. Indessen fand man, daß beide Ströme, der obere, wie der untere, der Ebbe und Fluth folgen, so daß zwei Stunden nach der Ebbe der obere Strom mit 0,5 Meilen pro Stunde nach Westen, der untere mit 1,2 Meilen auch nach Westen und $2^1/_2$ Stunde nach der Fluth der obere oceanische Strom mit 1,25 Meilen nach Osten und der untere mit 0,88 Meilen auch nach Osten fließt. Das Resultat dieser Bewegungen läßt sich dahin präcisiren, daß ein in der Oberflächenschicht schwimmender Körper nach jeder Fluth weiter zum Mittelmerr hin und schließlich in dasselbe hineingelangen würde, während ein in der untern Schicht befindlicher aus der Gibraltarstraße in den Ocean träte. In Gibraltar ist man am östlichen

Ende der Straße. Man fand in der obern Schicht das specifische Gewicht 1,0277 bei Ostwind und 1,0271 bei Westwind; bis 200 Faden stieg dasselbe auf 1,0279 und bei 300 bis 480 Faden auf 1,0295 d. h. die untere Schicht Mittelmeerwasser von voller specifischer Schwere. Im Mittelmeere gleichen sich wie die Temperaturen so auch die specifischen Gewichte mehr und mehr aus. Man fand bei Sicilien in der obern Schicht 1,0282 und in der untern 1,0286, in der Nähe der libyschen Küste 1,0293 und 1,0294. Die verticale Circulation fällt weg.

Die chemischen Untersuchungen der Luft aus dem oceanischen und dem Mittelmeerwasser verdienen hier nach ihren mittlern Resultaten Anführung. An der Oberfläche fand man die Luft im oceanischen Wasser zusammengesetzt aus 25 % Sauerstoff, 21 % Kohlensäure und 54 % Stickstoff, auf dem Boden aus 19,5 % Sauerstoff, 28 % Kohlensäure und 52,5 % Stickstoff. Und in einem Falle stieg der Kohlensäuregehalt auf 48 % und fiel der Stickstoff auf 36 % herab. Im Mittelmeere dagegen fand man in circa 1800 Faden Tiefe nur 5 % Sauerstoff, 60 % Kohlensäure und 35 % Stickstoff. Der Sauerstoff scheint durch Vertheilung von organischen Stoffen, wie sie z. B. der Nil in Massen zuführt, fast ganz in Kohlensäure umgewandelt. Es mag hier noch angeführt werden, daß durch die Dardanellen ein Unterstrom dichten Meerwassers in das schwarze Meer stattfindet und ebenso, daß im Sund ein Unterstrom nach der Ostsee hin und ein Oberstrom aus ihm herausgeht.

29. Luft- und Meeresströmungen machen also kalte Gegenden warm, und heiße Landstriche kühl, und beide dadurch bewohnbar. Die Luftströmungen sind zugleich die Träger der Luftfeuchtigkeit, und vermitteln dadurch die Vertheilung der atmosphärischen Niederschläge, so daß die Ertragsfähigkeit des Bodens hier vermehrt, dort ermöglicht wird. Nach zwei Seiten sind indeß die bisherigen Auseinandersetzungen zu ergänzen. Es handelt sich um die Wärme- und die magnetischen Linien, die man ähnlich den Meridianen und Parallelkreisen auf der Erdoberfläche construirt hat, um eine vergleichende allgemeine Klimatologie möglich zu machen.

Zuerst sind es somit die Mittelwerthe der Temperaturen, welche in Betracht gezogen werden müssen. Wenn unter den Tropen die mittlere Jahrestemperatur von der eines andern Jahres nur um 1° abweicht, so ist die Differenz in Paris schon 1°,3 und in Stockholm weichen sogar zehnjährige Mittel noch um 1° ab. Linien, welche Orte gleicher mittler Jahrestemperatur verbinden, sogenannte Isothermen — Alexander v. Humboldt — sind also nicht leicht zu construiren, es gehören langjährige Beobachtungen dazu, sie geben aber auch die interessantesten Aufschlüsse. Die mittlere Jahrestemperatur von 21° gibt in der Nähe des Aequators zwei Linien, eine ganz allein der Nordhälfte angehörig, die andere wesentlich auf der Südhälfte verbleibend. Letztere tritt vom 250. bis zum 22. Längengrade nördlich über den Aequator hinaus, und senkt sich nur einmal auf eine Länge von 20 Grade wieder unter denselben. Von 250° bis 290° d. L. fällt sie mit der nördlichen gleichwerthigen Isotherme zusammen, ebenso zwischen den Längengraden von 340 bis 360. Sie senkt sich nach der südlichen Erdhälfte nur bis zum 15. Breitengrade, während ihre nördliche Schwester bis an den Wendekreis des Krebses heranreicht und denselben auf nahezu 90 Grad (20 — 110 L.) parallel läuft und im nördlichen Afrika die vielleicht heißesten Punkte der Erde ankündet. In der Sahara glüht die Erde, flammt die Luft, im heißen Sande kann man Eier kochen und der aufsteigende heiße Wüstenwind — Samum — dringt über das Mittelmeer hinaus, herrscht als Scirocco über Italien und gelangt als Föhn zu den Alpenwällen der Schweiz. Diesen Verhältnissen in Verbindung mit dem Golfstrome hat Europa das höchst milde, die Vegetation außerordentlich hebende Klima seiner Westlande zu danken, welches auf der andern Seite des atlantischen Oceans an der Ostküste Amerikas in gleichen Breiten ungleich rauher ist, während es im Westen dieses Continents an den Küsten des stillen Oceans beim Aufschwunge der Isothermen nach Norden wiederum gelindern Charakter annimmt. Auf der südlichen Halbkugel sind die überwiegenden Wassermengen Ursachen eines mehr den Parallelen gleichmäßigen Verlaufes der Isothermen, während das vor allen Ländern begünstigte Europa

in hohen Breiten Isothermen aufweist, die in Amerika und Asien tief herabgehen.

Ein Umstand ist indeß noch sehr in Betracht zu ziehen. Ein im Innern des Continents oder weit vom Meere abgelegener Ort verhält sich in der Vertheilung der Jahrestemperatur auf Sommer und Winter ganz anders als ein Küstenort; dort sind große Sommerhitzen und große Winterkälten, hier ein mehr und mehr gleichmäßiges Klima das ganze Jahr hindurch. Beide Orte können aber deshalb gleiche Jahrestemperaturen haben, und es wird deshalb nöthig die Isochimenen von den Isotheren zu scheiden — Orte gleicher Winter- und Sommertemperaturen — Continentales Klima und Küstenklima sind für die Vegetation von großer Bedeutung, wie wir unten erfahren werden. Dove hat in die Meteorologie auch die Begriffe der thermischen Normalen und der Isanomalen eingeführt. Die mittlere Jahrestemperatur sämmtlicher Grade eines Parallelkreises ist leicht zu ermitteln und demnach auch die wenigen Orte, die eine der normalen (berechneten) entsprechende Temperatur haben: die Verbindungslinie dieser Orte heißen thermische Normalen. Andere Orte, und die meisten haben abweichende Temperaturen und unter ihnen sind nur diejenigen zu verbinden, welche eine gleichwerthige Differenz zeigen, sie heißen Isanomalen. Endlich nimmt auch die Wärme mit der Höhe über dem Meere ab, so wie die Länge der Tage und Nächte entscheidend auf die Fragen nach dem Anbau der Culturgewächse sich geltend macht. Es ist nicht unwichtig die klimatischen Zonen zu durchwandern. Man unterscheidet:

1. Die Aequatorialregion bis zu 15. Grade nördlich und südlich vom Aequator bei 22° mittlerer Jahrestemperatur, in den Bergen bis zu 600 Meter Höhe. Region der Palmen und baumartigen Gräser.

2. Zwei tropische Zonen bis zu den Wendekreisen hin, höchste mittlere Jahrestemperatur 16—18° und Höhe bis zu 1200 Mtr. Feigen, Palmen, Baumfarrn.

3. Zwei subtropische Zonen bis zum 34. Breitengrade und mit einer mittlern Temperatur von 14—15°, Höhe in den Gebirgen bis 1800 Meter. Region der Myrten und Lorbeern.

4. Zwei gemäßigte warme Zonen bis 44° B. oder 2400 Meter Höhe, von 10° mittlerer Temperatur. Weinstock und immergrüne Laubwälder. Der angebaute Weinstock reicht bis zum 51. Grade.

5. Zwei gemäßigte Zonen bis zum 58. Grade der Breite oder 3000 Meter Höhe; bei einer Mitteltemperatur von 5—6° die Region der blattwechselnden Laubhölzer, der Doldengewächse, der Kreuzblumen und der Wiesen; auch Moorländer und Haiden.

6. Zwei subarktische Zonen bis 66° B. oder zu einer Höhe von 3600 Meter. Mittlere Temperatur 2—2½°, Birken, Vogelbeerbaum, Moose; vorzugsweise aber die Region der Nadelhölzer.

7. Die eigentlichen Polarländer, in denen nur geringe Spuren von Vegetation anzutreffen sind.

Waizen und Roggen gehen allenfalls bis zum 62° B., Hafer nur bis zur Polargrenze, die Gerste reicht am weitesten nach Norden in Europa bis 70°, in Sibirien bis 60°, in Labrador nur bis 49° B.

Die Schneegrenzen sind in Bolivia 16500 Fuß, in Mexico 13900′, in Spanien 10500′, in den Schweizer Alpen 8350′, im Innern von Norwegen unter 62° B. 4800′, an der Küste unter 71° B. 2220′ über dem Meere. In Bolivia liegt La Paz mit 76000 Einwohnern 11520′ über dem Meere, in Neugranada Santa Fé de Bogota mit 30000 Einwohnern 8130′; in Armenien Wan 5100′. Die Paßhöhe des Mont Cenis hat auf 7610′ das höchste bleibend bewohnte Haus in Europa; im sächsischen Erzgebirge ist Gottesgab 3161′ und in Westfalen Winterberg 1958′ hoch gelegen.

30. Auch die atmosphärischen Niederschläge sollen hier berührt werden, um das allgemeine klimatische Bild zu vervollständigen. Es kann an einer gegebenen Oertlichkeit entweder nur regnen, oder es wechselt im Laufe des Jahres der Schnee mit dem Regen ab, oder endlich es fällt nur Schnee, und man unterscheidet demnach in den Tiefländern wie in den Bergen die Zonen des unveränderlich flüssigen, des veränderlichen und des unveränderlich festen Niederschlags: die Schneegrenze erreicht

aber auf der Nordhälfte der Erde nirgend das Niveau des Meeres. Die größten Regenmassen stürzen unter den Tropen herab: an den Westghats beträgt die Regenmenge 250 Zoll, welche wesentlich nur in den Monaten Mai bis September herabstürzt, und in Assam sogar 570 Zoll, weil daselbst der feuchtheiße Monsun in das enge Thal zwischen Himalaya und den hinterindischen Gebirgen eingeklemmt ist. In den Fjorden Norwegens liefern die von den herrschenden Südwestwinden gegen den steilen Abhang des Gebirges getriebenen Dämpfe des warmen Golfstromes noch 80 Zoll, während Stockholm nur 18 hat. Die Regenmenge auf den Küsteninseln des nördlichen Deutschlands beträgt 50 Zoll; im Innern sinkt dieselbe auf 20 Zoll herab. Der große Wüstengürtel von der Sahara am atlantischen Meere bis zur Wüste Gobi in Hinterasien ist regenlos. An den Küsten von Peru und Mexico hat der Passatwind Regenlosigkeit zur Folge, weil er seine über den großen Ocean gesammelten Feuchtigkeitsmengen an den Ostabhängen der Cordilleren niederschlägt und nun als trockener Landwind erscheint. Auf den Gebirgen nimmt mit der Höhe wegen der abnehmenden Temperatur die Regenmenge zu aber nur bis die mittlere Höhe der Wolkenschicht überschritten ist. In Clausthal ist der Regenmesser bis auf 54, auf dem Brocken nur auf 45 Zoll gefüllt. Was die Zeit der Niederschläge anlangt, so sind die Orte von bestimmten Regenzeiten von denen zu unterscheiden, an denen der Regen sich an keine Jahreszeit bindet. An letztern steht die Vegetation in üppiger Fülle, an erstern ist dieselbe nur vorübergehend und weicht dann einer trostlosen öden Dürre. Innerhalb der Tropen trifft man die Regenzeit an einem bestimmten Orte, wenn die Sonne für denselben ihren höchsten Stand erreicht hat. Am südlichen Wendekreise z. B. wird die Mitte derselben auf den 21. December fallen. Die Regen haben dann die Form von Gewitterschauern, welche meist nach Mittag eintreten, während die übrige Tageszeit heitres Wetter ausfüllt. Während der Schauer fällt das Wasser wie Fäden herab, und man kann oft süßes Wasser von der Oberfläche des Meeres schöpfen. Diese Zone der Tropenregen schiebt sich nun wie ein großer planetari-

scher Wolkengürtel dem Stande der Sonne folgend zwischen den Wendekreisen parallel zu sich selbst hin und her. Ist er bis zum nördlichen Wendekreise vorgerückt, dann erreicht der Aequatorialstrom die Erdoberfläche in verhältnißmäßig höhern Breiten; die Alpen, Deutschland und das nördliche Europa haben dann ihre Regenzeit, es ist die Zone des vorherrschenden Sommerregens; das südliche Italien und Nordafrika haben dagegen Winterregen, weil die Sonne am Wendekreise des Steinbocks den Aequatorialstrom schon in diesen Breiten die Erdoberfläche erreichen läßt. In England, auf der Westküste von Frankreich, in den Niederlanden, in Norwegen und Finnland sind die Herbstregen vorherrschend. In Deutschland kommen 18 Regentage auf den Winter, 22 auf den Frühling, 37 auf den Sommer und 23 auf den Herbst von 100 Regentagen im Jahre, im südlichen Europa gibt es aber 120, im mittlern 150 und im nördlichen 180 solcher Tage. Das Continental-Klima hat weniger Regentage als das Küsten-Klima; Petersburg hat z. B. 168, während Kasan 90 und Jakutzk 60 aufweist. Jahresmittel der Regenmenge lassen sich kaum aufstellen, weil sie in den verschiedenen Gegenden zu großen Veränderungen ausgesetzt sind; Bombay hatte 1824 nur 31 Zoll, 1828 aber 113.

31. Die dritte große Reihe von allgemeinen Beobachtungen bilden die Isogonen, Isoclinen und Isodynamen, Linien gleicher Declination, gleicher Inclination und gleicher magnetischer Kraft. Die Erde ist nämlich ein Magnet, und ihre magnetischen Pole liegen in 70° 5′ 17″ NB. und 263° 14′ 42″ L. so wie in 73° s. B. und 207° 30″ L. nach dem Meridian von Greenwich; sie hat demnach auch eine magnetische Axe und magnetische Meridiane — Isogonen — und einen magnetischen Aequator mit den analogen Parallelkreisen — Isoclinen. Daß die Erde aber magnetische Wirkungen ausübt, geht schon aus der einen Thatsache hervor, nach welcher senkrecht stehende Eisenstäbe allein durch die Dauer der Zeit magnetisch werden, und alle Wirkungen eines künstlichen Magneten aufweisen. Weiter aber sind die Declinationen und Inclinationen für den Erdmagnetismus vollständig ausreichende Beweise. Nach der Ampére'schen Theorie ist die

beständig vorhandene Luftelektricität, herrührend aus Temperaturdifferenzen mit ihrem Gefolge von Erscheinungen und die Axendrehung der Erde, durch welche dieselbe also beständig von elektrischen Strömen umkreist wird, die Ursache des Erdmagnetismus, der also nach der Schulsprache Elektromagnetismus sein muß. Was die Theorie nicht wenig erhöht, ist das specifische Gewicht der Erde, das nach mehrfachen Berechnungen auf 5 bis 6 angegeben werden kann, d. h. die Erde ist 5 oder 6 mal so schwer als eine gleich große Kugel von Wasser. Da nun aber die Erdrinde aus Stoffen besteht, die zunächst ein specifisches Gewicht von 2 bis 3 haben, so müssen im Innern Stoffe von größerer Dichte sich vorfinden die den magnetischen Verhältnissen Einfluß gestatten, selbst ein feurig flüssiger Zustand dürfte dem nicht entgegenstehen, weil der Einfluß der Wärme mithin die Lockerung der Cohärenz-Verhältnisse durch den Druck der Erdrindeschichten aufgewogen wird.

Als magnetischer Aequator ist offenbar die Linie anzusehen, welche alle Punkte ohne Inclination verbindet. Sie liegt in der Nähe des Aequators meistens auf der nördlichen Seite desselben, weil die Continente ihrer größern Wärme halber ihn heranziehen, während er inmitten des stillen Oceans unterhalb den geographischen Aequator, also auf die Südseite desselben herabsinkt, weil die Nähe des südamerikanischen Continents gegen die mittelamerikanischen Inselgruppen sichtbar ganz andere Wärmeverhältnisse schafft. Denn um es hier gleich anzuführen, Wärme und magnetische Kraft sind auf der Erde in umgekehrten Verhältnissen vorhanden. Wo die größte Wärme, da die geringste magnetische Kraft, da schwebt die Vertikal-Nadel beständig horizontal und umgekehrt, wo dieselbe fast oder ganz lothrecht steht, an den magnetischen Polen also, da ist ein Punkt der größten Kälte. Von dieser Seite also sind die magnetischen Linien für die allgemeine Schilderung des Klimas von bedeutendem Werthe, und um zu der Linie ohne Abweichung zurückzukehren, fügen wir den schon gemachten Angaben hinzu, daß die Knotenpunkte, wo also magnetischer und geographischer Aequator sich schneiden, unter 10° und 210° L. (nach dem Meridiane von Paris) liegen, und

daß dann beide noch für 20 Längengrade zusammenfallen, so daß der Lauf des magnetischen südlich unter dem geographischen Aequator eine Länge von 140° einnimmt.

Unter den meridianartig sich hinziehenden Isogonen ist die erste oder die Linie ohne Abweichung vor allen merkwürdig. Sie geht durch die beiden magnetischen Pole zu gleicher Zeit und theilt die Erdoberfläche in zwei Theile, in deren einem welcher die Ostküste Amerikas, den atlantischen Ocean, Europa und Afrika umfaßt, die Ablenkung westlich, während sie in dem andern östlich ist. Offenbar zusammenhängend mit der großen Wasserfläche des stillen Oceans, die wegen ihrer Größe gegen die benachbarten Festlande auf der Nordhälfte der Erde so viele klimatische Verhältnisse umändert, ist die Thatsache, daß am Ostrande Asiens und dem anliegenden Oceane eine zweite Linie ohne Abweichung sich befindet, die in sich zurückläuft und Punkte verbindet, die einen Raum umschließen, innerhalb dessen die Abweichung eine westliche ist statt der östlichen, die die Lage erwarten ließe. Alles Uebrige, was die magnetischen Linien im Einzelnen betrifft, muß man in geschickt entworfenen Karten studiren, die sich besser und leichter und übersichtlicher lesen lassen, als es längere Beschreibungen gestatten. Die westliche Abweichung beträgt für London ungefähr 25°, für Paris 22°, für Brüssel 21°, für Göttingen 18°, für Berlin 17°, für Petersburg 7°, für Moskau 3°. In Wien war 1854 die westliche Abweichung 13° 6′ mit einer jährlichen Abnahme von von 9′,15, so daß sie 1940 ungefähr die Größe 0 haben wird. In Paris war vor 300 Jahren die Ablenkung östlich, vor etwa 200 Jahren = 0 und jetzt ist sie westlich aber auf der Umkehr begriffen. Diese sogenannten säcularen Schwankungen der Magnetnadel weisen auf tiefgehende Ursachen für klimatische Veränderungen hin, es steht offenbar die Vereisung Islands und Grönlands, das verhältnißmäßig milder gewordene Klima an der sibirischen Küste, an der 1799 der große Eisblock aufthaute, in dem man den vorweltlichen Elephanten vollständig unversehrt erhalten fand, im nächsten Zusammenhange damit. Diese Vermuthung wird noch bedeutend wahrscheinlicher, wenn man von dem Gange der Jah-

res-, ja der Tages-Wärme ebenfalls die Declinationsnadel abhängig sieht, und ihre jährlichen und täglichen Schwankungen damit in Verbindung bringt. Für die Jahresschwankung zeigt der August die größte, der Februar die kleinste Ablenkung nach Westen, und die gleichen bezugsweisen Tageszeiten fallen zwischen 1 und 2 Uhr Mittags und 7 bis 8 Uhr Morgens.

Für die Inclination mag bemerkt werden, daß die Neigung in Mokka 7°, in Alexandrien 44°, in Malta 53°, in Marseille 63°, für Paris 67°, für London, Göttingen, Berlin 68°, für Petersburg 71° ist. Die Neigung hat sich innerhalb 40 Jahren in Berlin um 2 Grad geändert.

Nachdem Alex. v. Humboldt auf seiner Weltreise auffallende Abweichungen entdeckt hatte, construirte man endlich noch Isodynamen d. h. Linien gleicher magnetischer Kraft oder Intensität und Gauß und Weber in Göttingen entwickelten die mathematische Theorie des Erdmagnetismus so genau, daß die Rechnungen mit den wirklichen Beobachtungen hinlänglich übereinstimmen. Hansten in Kopenhagen endlich hat für 1600, 1700 und 1800 isogonische Karten gezeichnet, während für die Beobachtung mit Inclinatorien ein Gleiches nicht geschehen ist, weil nicht hinreichende Beobachtungen vorhanden.

Zum nähern Verständniß der periodischen Abänderungen der Magnetnadelrichtung gibt Moser die nachfolgende Erklärung ab: die ganze Erdrinde ist magnetisch und wird lokal da geschwächt, wo die Wärme derselben am größten ist. Daher geht des Vormittags, insofern alsdann sich die Ostseite erwärmt, auf der nördlichen Halbkugel der Nord-, auf der südlichen der Südpol nach Westen. In der Richtung des Meridians sind auf der nördlichen Halbkugel die südlichen Theile am Tage am stärksten erwärmt, also wird vom Vormittag ab der Nordpol der Nadel weniger angezogen, und die Inclination nimmt ab, während aus derselben Ursache die horizontale Intensität zunimmt. Da überdieß die Temperaturdifferenzen zu einerlei Zeit auf den Meridianen geringer sind, als auf den Parallelkreisen, so sind die Declinationsänderungen größer als die der Inclination: die magnetischen Schwankungen sind wie die thermischen bei Tage größer als bei

Nacht, im Sommer größer als im Winter, bei bedecktem Himmel geringer als bei heiterm. In der heißen Zone sind die Declinations- und Inclinationsschwankungen sehr gering, weil die Temperatur dort wenig sich abändert; dagegen werden daselbst wahrscheinlich die Intensitäts-Variationen größer, wegen des entgegengesetzten Magnetismus im Norden und Süden. Die Zeit der mittlern Declination ist wie die mittleren Temperaturen des Vormittags constanter als des Nachmittags. Die mittlere jährliche Declination fällt mit der mittlern Jahreswärme zusammen, und wahrscheinlich die mittlere Frühjahrswärme mit dem Maximum der Inclination und dem Minimum der horizontalen Intensität, die mittlere Herbstwärme mit dem Minimum der Inclination und dem Maximum der Declination.

32. Die oben angedeuten Variationen der Wärme werden durch das Barometer verkündet, da die erste Ursache seines Steigens und Fallens eben die Wärme ist. Wenn nämlich durch irgend eine Wärmequelle die Luft über dem Standorte des Barometers sich ausdehnt, so steigt sie in die Höhe und gewissermaßen säulenartig über die Grenze der Atmosphäre empor, um nach beiden Seiten hin über die kältern Luftschichten abzufließen und das Gleichgewicht herzustellen, während unten in den erwärmten Raum allmählich die kühlere Luft eindringt, was indeß nicht so schnell geschieht. Der Vorgang der lokalen Erwärmung wird durch das Fallen des Barometers markirt. Das Barometer fällt aber nicht allein, wenn in seiner Nähe das Thermometer steigt, sondern auch, wenn es weitab fällt. In diesem Falle ist nämlich der Standort des Barometers wiederum der relativ wärmere und dieselbe Erscheinung wie vorher muß für das Abströmen der warmen Luft an der obern Grenze und das Zuströmen der kalten an der untern Grenze der Atmosphäre stattfinden. Demgemäß zeigt das Barometer den Gang der Tageswärme an, es hat nämlich zweimal ein Maximum und eben so oft ein Minimum der Höhe, die erstere um 10 Uhr Morgens und Abends, die andere um 4 Uhr des Morgens und Nachmittags, analog der Wärme und ihren Ausgleichsphasen. Am Aequator sind die Beobachtungen eines Tages hinreichend,

um die entsprechenden Zeiten, die natürlich von Ort zu Ort und nach Lage der Breite und Höhe wechseln, festzustellen. Monatliche Beobachtungen machen in Deutschland die täglichen Schwankungen des Barometers wahrnehmbar, zu genauern Feststellungen sind in Halle noch nicht zwölfjährige Messungen ausreichend gewesen. Sicher ist, daß für höhere Breiten das Maximum am Morgen und Abende wie das Minimum am Mittage im Winter der Culmination der Sonne näher liegen, als im Sommer, wie daß das Maximum am Morgen im Sommer näher an Mitternacht liegt als im Winter. Die Differenz aus dem Mittel der Maxima und dem Mittel der Minima beträgt in Cumana und La Guayra 2,124^{mm} und in Petersburg und Abo 0,1^{mm}.

Daß den täglichen Variationen auch jährliche entsprechen werden, versteht sich von selbst: nur ist für Orte mit continentalem Klima die Feststellung constanter Zahlen ungleich schwerer als für solche, die Küstenklima haben. Man beobachtet an erstern meist nur ein Maximum im Winter (Februar) und ein Minimum im Sommer (August), letztere dagegen haben zwei Maxima und zwei Minima.

Die zweite Ursache der Schwankungen des Barometers ist die Richtung des Windes und zum Theil auch der Gehalt an Feuchtigkeit, die die bewegte Luft in sich trägt. Wärmere Winde haben niedern, kältere höhern Barometerstand zur Folge. In Europa bringen Süd- und Südwest-Winde, die freilich auch die wärmsten sind, den meisten Regen und man hat daher wohl angenommen, daß der leichte Wasserdampf an dem niedrigen Barometerstande seinen Antheil habe. Das ist indeß weniger der Fall, da der Einfluß der Dämpfe nicht so bedeutend sein kann um das Maß der Schwankung selbst zu erklären. Bei Regenschauern oder bei momentanen Erscheinen von schweren Regen- und Gewitterwolken steigt nicht selten das Barometer um sofort auf den frühern Standpunkt zurückzusinken, sobald die größere Luftfeuchtigkeit durch den fallenden Regen oder die forteilenden Wolken verschwindet. Bleibt aber das Barometer am Steigen, so werden vorläufig unmerkbar wärmere Winde durch kältere ersetzt, was sich bald nachher auch an der Wetterfahne zeigt, so

daß nun der erst entwickelte Thatbestand klar hervortritt. Wenn dagegen das Wetter anhaltend regnerisch ist, so steht das Barometer meist um so viel tiefer als die Differenz der Stände bei Süd- und Südwest-Winden gegen Nord- und Nordost-Winde erfordert. Rasche Schwankungen des Barometers deuten Sturm an. Wenn auf weiten Erdflächen die Lufttemperatur ungewöhnlich hoch, an andern dagegen sehr niedrig ist, so kann das Gleichgewicht des Luftmeeres nur durch vielfache Strömungen wieder hergestellt werden. Das Barometer sinkt dann sehr schnell, um eben so schnell wieder zu steigen, der unruhige Gang deutet den kommenden Sturm mit Sicherheit an, und wenn man meinen sollte, daß erst Sturm und dann Barometerschwankungen statt finden müßten, so ist zu bedenken, daß das Auf- und Abfluthen in allen Theilen der Atmosphäre in den lokalen und niedrig stehenden Windmessern nicht früh genug ermittelt werden kann.

Die Luftfeuchtigkeit ist, wenn auch nicht in Betreff des Barometers unmittelbar, doch immer ein sehr beachtungswerther Factor für meteorologische Untersuchungen. Ihre Bestimmung durch das Hygrometer von Daniell und das Psychrometer von August erkennt man am besten aus praktischen Beispielen. Ist die Lufttemperatur 25^0 und der Barometerstand 758^{mm}, so üben nach den Tafeln von Magnus die in der Luft enthaltenen Dünste im Sättigungszustande einen Druck von $23^{mm},5$ aus, und wenn nun die Kugel des Hygrometers bei $11^0,87$ beschlug und der Dunst bei $13^0,13$ verschwand, so daß der Thaupunkt $12^0,5$ ist hierfür aber den Druck der Wasserdünste $10^{mm},77$, so muß dieser der $\frac{10,77}{758}$ Theil oder in Procenten ausgedrückt gleich 1,42 sein $\left(\frac{10,77}{758} = \frac{x}{100}\right)$; $23^{mm},5$ sind aber in Procenten des Luftdruckes $3^{mm},1$, also ist die Differenz 1,69 und die Luft enthält also weit weniger Wasserdampf, als sie aufnehmen kann, ist also verhältnißmäßig trocken.

Ist ferner e die Spannung der in der Luft vorhandenen Dünste, $e_,$ das Maximum ihrer Spannkraft für die Temperatur $t_,$ am umwickelten Theil des Psychrometers, so ist für den

Barometerstand b und die Lufttemperatur t die Formel gefunden $e = e_{,} - 0{,}0008\, b\, (t - t_{,})$ wenn t positiv, wenn aber t negativ ist dann ist $e = e_{,} - 0{,}0007\, b\, (t - t_{,})$. Ist nun $t - t_{,} = 5$ wenn $b = 760^{mm}$, dann ist für t positiv $e = 9{,}751 - 0{,}0008.\ 760.\ 5 = 6{,}25$. Endlich hat man eine Tafel berechnet, nach der man den absoluten Inhalt von Feuchtigkeit in der Luft bestimmen kann. Dieselbe gibt für die oben angeführten Zahlen : $t = 16$ den Werth 7 d. h. die Luft hat in einem Cubikmeter 7 Gramm Wasserdampf. Es kann noch angemerkt werden, daß die Luft im Sommer relativ trockener als im Winter ist, und in jenem also die Psychrometer-Differenz größer ist als in diesem, während der April im allgemeinen die geringste Feuchtigkeit aufweist. Bei Nebeln findet nicht selten eine Uebersättigung statt, dann bildet sich auf der umhüllten Kugel ein Niederschlag und die frei werdende Wärme macht das Thermometer steigen, so daß es höher steht als das der freien Luft ausgesetzte.

Wie lokale Verhältnisse einwirken geht aus einer Zusammenstellung forstlich-meteorologischer Beobachtungen aus dem Königreiche Baiern hervor. Nach denselben ist die Bodentemperatur bewaldeter Gegenden im Mittel um $1^{0}{,}5$ niedriger als die waldfreier; die Lufttemperatur ist wie beim Küstenklima im Winter höher, im Sommer niedriger, als dort, wo es keine Wälder gibt. Auch Nachtfröste kommen seltner in Waldländern vor. Je bewaldeter die Höhenzüge sind, desto geringer die Abnahme der Boden- und Lufttemperatur, desto größer die relative Feuchtigkeitsmenge, desto größer auch die Regenmasse. Die Ozonzunahme ist im Innern der Wälder geringer als an den Rändern derselben, aber gleich stark im Winter und im Sommer, also nicht abhängig von den grünen Blättern, sondern von der Verdunstung und den dadurch erregten electrischen Strömungen. Endlich sind auch Waldgegenden freier von Epidemien, weil der Boden mit Feuchtigkeit gesättigter ist als der von waldfreien Landstrichen, welcher seiner Porosität halber den Miasmen zugänglicher zu sein scheint; der vermehrte Ozongehalt ist wenigstens an dieser Erscheinung nicht betheiligt.

33. Endlich soll an dieser Stelle eine meteorologische Mit-

theilung der Kölnischen Zeitung, Jahrgang 1872, Nro. 360 drittes Blatt — über den November 1872 angeschlossen werden, der seines Gegenstandes und auch der Art und Weise halber, wie er mitgetheilt worden, instructiver ist als lange wissenschaftliche Erörterungen, gewissermaßen aber auch den Inhalt der letzten Paragraphen wie durch ein anschauliches Beispiel illustrirt. „Während dieses Monats war in Folge der oft vorherrschenden stürmischen Winde aus Südwest das Wetter meist trübe und regnerisch und die Ozon-Reaktion sehr kräftig. Die Temperatur stellte sich im Mittel als zu hoch, der Barometerstand als zu niedrig heraus. Der Regen fiel in vielen Gegenden Europas in solcher Menge, daß die Flüsse aus ihren Ufern traten und große Verheerungen anrichteten. Etwa fünfzig Tage nach dem Frühlingsäquinoktium und ebenso nach der Herbst-Tag- und Nachtgleiche kommt in den meisten Jahren ein plötzlicher Temperatursturz vor. Die Temperatur-Erniedrigung im Mai zur Zeit der drei sogenannten strengen Herrn oder Eismänner ist allgemein bekannt; nach dem Herbstäquinoktium stellt sich in der Regel am 11. November der Vorwinter ein. Im laufenden Jahre brach der letztere über Norddeutschland am 12. und 13. November mit den furchtbaren Stürmen aus Nordosten herein, und hielt wenn auch nur mit gelinden Nachtfrösten bis zum 20. an. An der Nordküste war der niedrigste Thermometerstand — 1,6, — 2,4, — 1,8, — 1,4, — 1,9 an dem 13., 14., 15., 16. und 17. und die Temperatur vom 11. bis 21. jeden Tag im Mittel um 1 ^{0} zu niedrig. Diese Kältezone erstreckte sich jedoch nur als unverhältniß schmaler Streifen vom weißen Meere bis zur Nordseeküste herab. Auf beiden Seiten dieses Winterfelds war die Luft warm; in Süddeutschland war die Temperatur während des ganzen Monats höher als die normale. Vom 11. bis zum 15. fand in Nordamerika eine ähnliche Vertheilung der Temperatur wie in Europa statt. In der Mitte dieses Continents erstreckte sich eine Zone kalter Luft von Labrador über den Obern See bis zum Missisippi-Thale, bis südlich vom 45. Breitenparallel herunter. In Folge der verschiedenen Luftströme, welche sich gegenseitig rasch verdrängten, war die Barometerquecksilbersäule

in steter Bewegung. Dieses findet seine Erklärung in der steten Ortsveränderung des höchsten und niedrigsten Luftdruckes über Europa. Das Streben der Luft in den Zustand des Gleichgewichts zu kommen, manifestirte sich wie immer in den untern Regionen als Sturm, in den obern des Luftmeeres als Nordlicht. Eine im November seltene Erscheinung war die Zone hohen Luftdruckes, welche sich vom 10. bis 14. von der Ostküste Amerikas aus in der Richtung von W. S. W. nach O. N. O. über den nordatlantischen Ocean, Irland, Norwegen und Finnland forterstreckte. An der Südküste dieser Zone stand das Barometer sehr niedrig. Eine Folge dieser enormen Störung des Gleichgewichtes und der abnormen Vertheilung des Druckes im Luftmeere war der Sturm, welcher über die Ostseeküsten schweres Unglück und namenloses Elend gebracht hat. Da die Richtung des Sturmes mit der längsten Erstreckung der Ostsee zusammenfiel, so schob derselbe die Wassermasse vor sich her, was zur Folge hatte, daß die Fluthöhe von Ost nach West hin, von der pommerschen Bucht bei Swinemünde bis zur Kieler Bucht und von da nördlich an den Ostküsten von Holstein, Schleswig und Jütland immer größere Dimensionen annahm. Da, wo dem im Westen aufgestauten Wasser ein weiteres Vordringen nicht möglich war, war es nun zum Rücklauf gezwungen, und so erreichte es sein Maximum an den östlich gelegenen Orten erst später als an den westlich gelegenen. Zwischen Swinemünde und Stralsund erreichte die Sturmfluth ihr Maximum am 13. Vormittags, auf der Insel Zingst, welche der Vernichtung nahe war, gegen 2 Uhr Nachmittags, in der Neustädter Bucht um 5 Uhr, an den holsteinischen Küsten und weiter nach Norden hinauf gegen 9 Uhr Abends. Die Fluthöhe übertraf dort am 13. den höchsten Wasserstand, welcher so weit bekannt, an der Ostküste der Herzogthümer vorgekommen, und zwar den im Jahre 1694 um 24, und den vom Jahre 1836 um 28 Zoll. Im Allgemeinen ging die Höhe des Wassers über den 0-Punkt um 11 Fuß hinaus. In der Nordsee schwächte derselbe Nordoststurm den Fluthstrom, welcher sich durch den Canal in dieselbe ergießt, und trieb letzteren außerdem von der deutschen Nordseeküste ab; daher war der

Wasserstand daselbst ungeheuer niedrig. In der Elbe bei Wilhelmsburg war am 14. so wenig Wasser, daß die von Harburg nach Hamburg segelnde Dampffähre nicht an der gewöhnlichen Landungsbrücke anlegen konnte. Andrerseits wurde das Wasser in der Nordsee constant westwärts getrieben und an der Ostküste Englands zu einer gefahrdrohenden Höhe aufgestaut. In Mitteldeutschland und am Rhein traten gleichzeitig mit dem Nordsturme heftiger Schneefall und niedrige Temperatur ein; letztere hielt bis zum 18. an.

Im letzten Drittel des Monates war der Luftdruck im südlichen und südöstlichen Europa sehr hoch, aber längs der Küstenstrecken welche wieder im Bette des Aequatorialstromes lagen, ungewöhnlich niedrig. Dieser Vertheilung des Druckes entsprachen Wind und Wetter in den verschiedensten Ländern Europas aufs genaueste. Ueber dem mittlern und südlichern Theile unseres Erdtheils vom Rheine bis zum schwarzen Meere hatte die Luft für die Jahreszeit eine ungemeine hohe Temperatur. Im west- und nordwestlichen Europa aber blieb das Wetter kühl, regnerisch und stürmisch. Am 22. wurde aus Algier berichtet, seit 72 Stunden weht der Scirocco. Zu Bludenz wehte der Föhn am 19., 20., 22., 23., 26.; am 28. war die Temperatur höher als die normale. In Sibirien hatte gleichzeitig der Winter Platz gegriffen; Orenburg hatte — 20°, Barnaul — 13; Irkutzk — 20 und Nertschinsk — 19°. Im Westen, in Frankreich und an den britischen Küsten floß der Regen stromweise hernieder und rasch folgte Sturm auf Sturm. Eine besondere Beachtung verdient der höchst glänzende Sternschuppenfall am 27., welcher selbst die gewiegtesten Astronomen überraschte, als meteorisches, die Einsicht in den Organismus des Sonnensystems förderndes Phänomen. Aus allen Ländern Europas auch aus Afrika liegen ausführliche Berichte über diesen besonders von 8—11 Uhr Abends massenhaften Fall von Sternschuppen vor. Verschiedene Beobachter schätzen die Zahl derselben, welche in dem angegebenen Zeitpunkte wahrgenommen wurden, auf 20 bis 30 Tausend. Der Ausgangspunkt der Sternschuppen war die durch das Sternbild des Perseus fixirte Stelle des Himmelsgewölbes. Die Autoritäten

auf dem Gebiete der Himmelskunde: d'Arrest, Bruhns, Denza, Foerster, Galle, Klinkerfues, Secchi, Weiß u. m. a. stimmen darin überein, daß am 27. Nov. die Erde bei ihrer Bewegung um die Sonne die Bahn des längere Zeit vermißten Biela'schen Kometen an der Stelle durchschnitten habe, in welcher letzterer sich einige Wochen früher hätte befinden müssen. Da somit die wahrgenommenen Sternschuppen als zum Gefolge des Kometen gehörig betrachtet werden dürfen, so wird durch diesen ausgezeichneten Sternschuppenfall die Theorie Schiaparelli's betreffend die nahe Beziehung, in der die Sternschuppen zu den Kometen stehen, aufs Neue glänzend bestätigt.

Nordlichter kamen auch im November während der außerordentlichen barometrischen Steigung wieder häufig vor. Ungeachtet des in Nordwest- und Nordost-Europa meist bewölkten Himmels wurden dieselben wahrgenommen: in der Nacht zum 1. an verschiedenen Orten Englands, am 1. und 2. zu Emden, am 3. zu Thurso, Emden, am 5. Emden, am 6. zu London, Shields, Wyk, am 7. im nördlichen und östlichen Schottland, am 9. Archangel, Wyk, am 11. zu Thurso, Archangel, am 19. zu Emden, am 20. zu Cambridge, am 21. zu Wyk, am 27. in Schottland, am 28. und 29. zu Emden. Gewitter, welche im November seltner sind, kamen vor am 31. October und 1. November zu Valencia, York, Nottingham, Rochés, Goint, Scudisnäs, Oxö. Am 3. ebenso mit einem furchtbaren Unwetter welches sich von England aus über die Nordsee nach Jütland verbreitete. Am 8. Gewitter im Norden Schottlands, am 12. im biscayischen Meerbusen und im St. Georg's Canale, am 19. und 20. an der Ostküste Irlands, am 25. im südöstlichen Irland, am 29. im Südwesten von Irland. Blitze und Donner wurden wahrgenommen am 2. und 5. zu Dover, am 6. zu Thurso und Wyk, am 8. zu Thurso, am 9. zu Emden; Erdbeben aber in England am 18. in ziemlich bedeutender Ausdehnung, am 20. zu Tunis und am 24. in der obern Neckargegend.

34. Für den Schluß dieses Abschnittes verbleibt nur noch eine kurze Betrachtung der sogenannten Hydrometeore, unter

welchem Gesammtnamen man Nebel und Wolken, Regen, Schnee und Hagel, Thau und Reif, und auch wohl Glatteis begreift: Gewitter und Nordlichter schließen sich an, die erstern, weil sie für einige der aufgezählten Erscheinungen die unmittelbare Ursache sind, die letztern, weil sie im engsten Zusammenhang mit jenen stehen.

Nebelländer sind, wie Jedermann weiß, vorzugsweise Nordländer, und die Erscheinung selbst so bekannt, daß die Zusammenstellung mit dem Schwaden, der sich über siedendem Wasser bildet, und an hineingehaltenen kalten Gegenständen tropfenweise niederschlägt, Niemanden auffällig erscheint. Wasserreiche Thalgründe und Bergschluchten, Torfmoore, Landseen liefern an heitern Abenden durch die ungleiche Erwärmung der Wasserflächen und der trockenen Ufergelände die Bedingungen für die Entstehung des Nebels; die Wasserdünste verdichten sich nämlich in Folge der vom abgekühlten Uferrande herbeiströmenden kalten Luft und ballen sich je nach dem Kältegrade dieser Luft dichter und dichter zusammen. Warme Sommerabende zeigen keine Nebel, weil der Temperaturunterschied der trockenen und feuchten Gelände zu gering ist; südliche Breiten haben aus demselben Grunde zu keiner Jahreszeit den Nebel als allgemeine Erscheinung, aber in den nördlichen Gegenden zeigt er sich überall und vorzugsweise in den Uebergangszeiten vom Winter zum Sommer und umgekehrt, weil alsdann beim verhältnißmäßig frühen Niedergange der Sonne das Land sich rasch genug abkühlt, um zu den wärmern Wasserflächen abgekühlte Luft hinsenden zu können. Tritt in den Abendstunden zugleich eine Aenderung der Windrichtung ein, so daß Strömungen aus Nord und Nordost die Temperatur noch mehr erniedrigen, so treten die Nebelmassen urplötzlich hervor und oft so dicht, daß man nicht zwei Schritte entfernte Gegenstände wahrnehmen kann. Dergleichen nimmt man oft an Meeresufern wahr, oder in weiten Thälern, die viele Seen oder Teiche haben. Die kalte Luft, welche den Nebel gebildet hat, hält ihn auch während den Nachtstunden in den tiefern Regionen der Atmosphäre fest, erst beim Aufgange der Sonne ändert sich das Bild, der Nebel steigt entweder in die Höhe oder er sinkt zu Boden. Der Nebel steigt, wenn ein warmer Luftzug von der Thalsole

her ihn erhebt und der obern verhältnißmäßig trockenen und warmen Atmosphäre zuführt; der Nebel fällt, wenn der warme Luftstrom nicht vorhanden, und über den Nebelmassen kühlere Luft eine Schutzwehr gegen das Aufsteigen bildet. Das Fallen des Nebels ist ein Vorbote guten Wetters, da dann weder die Feuchtigkeit der Luft vermehrt wird, noch wärmere Winde angezeigt werden, die Regen und Nässe zur Folge haben.

Nebelbildungen gewahrt man auch nach starkem Gewitterregen im Dampfen des Waldes, was sich leicht aus der Temperaturdifferenz unterhalb des wärmern Wald- und Laubdaches und der darüber wehenden kalten Luft erklärt. Dieses Rauchen oder Dampfen des Waldes setzt sich oft mehrere Tage lang fort, weil der Wald viel Feuchtigkeit zurückhält, deren Verdunstung erst allmälig gestattet, und die kältere Luftschicht über ihm eine starke Nebelbildung hervorruft. Was der gemeine Mann trockene oder gar stinkende Nebel nennt, ist Haide- oder Höhenrauch, der Haide- und Moorländern seine Entstehung verdankt, und schon der Höhe halber, in welcher er dem Ursprunge fernliegenden Landstrichen erscheint, unmöglich Nebel sein kann. Man hat lange über Natur und Ursprung des Höhenrauches gestritten und wollte es einiger zufälliger Erscheinungen halber nicht wahr haben, daß er hauptsächlich den Moorbränden in der westphälischen Niederung sein Dasein verdanke. Denn indem der Rauch in dicht zusammengeballten Massen durch Nordwestwinde bis zum schwarzen Meere sich verbreitet aber nicht selten durch entgegengesetzte Winde zurückgeworfen und dann auch seit- und rückwärts getragen wird, war man über seine Geburtsstätte in Zweifel gerathen, und suchte lieber sonderbare Veranlassungen zur Erklärung auf, als daß man dem Naheliegenden Glauben schenkte. Namentlich sollten es „verdorbene" Gewitter sein, Gewitter also, welche nicht zum Ausbruche gekommen wären, vertrocknet seien, aber doch den eigenthümlichen leicht erkennbaren Geruch zurückgelassen hätten. Man bedachte freilich nicht, daß Rauch die Luftelectricität schwächt und ableitet, und daß er also den Ausbruch eines Gewitters geradezu hindert.

Wenn endlich in weiten Niederungen die Wolken sehr tief

herabgehen, und den ganzen Himmel bedecken, so würde die Luft mit Feuchtigkeit übersättigt werden, wenn sie sich nicht durch einen feinen Staubregen entleeren könnte. Auch dieser Regen heißt nicht selten im Munde des gemeinen Mannes Nebel, obgleich hier auch der Niederschlag so wie die Höhe, aus der er herabfällt, den Begriff verbieten.

Zwischen Nebel und Wolken ist in Hinsicht der Entstehung kein Unterschied vorhanden, diese wie jene sind verdichtete Luftfeuchtigkeit, die dann entsteht, wenn kalte Luftströme in wärmere und feuchte Luftregionen hineinströmen, ihr Unterschied beruht allein auf der Höhenlage, so daß sogar aufgestiegene Nebel in höhern Kreisen der Atmosphäre als Wolken erscheinen. Wolkenbildungen sind demnach als solche zumeist in den Jahreszeiten zu erwarten, in denen nicht der Aequatorial- oder der Polar-Windstrom vorherrscht, sondern in denen beide sich mit einander mengen. Wolkenbildungen dieser Art geben nicht unmittelbar Niederschläge, sie bleiben am Himmel längere oder kürzere Zeit stationär, und entzücken oft durch sonderbare Formen und Gestaltungen. Der Volksmund sagt „im August regnen nicht alle Wolken“. Diese grotesken, bald weißen, bald grauen, bald eigenthümlich von der Sonne beleuchteten Wolkengestalten nennt der Gelehrte Haufenwolke — cumulus —, während die mehr gleichmäßig den Himmel bedeckende, oft schichtenweise am Grunde des Horizontes gelagerte Wolke Schichtwolke — Stratus — heißt und die kleinen meist hoch am Firmamente schwebenden, an den Kanten mannigfach zerrissenen Bildungen mit dem Namen Federwolken — cirrus — belegt werden. Combinationen dieser Formen faßt man unter den Namen cirrocumulus, cirrostratus und cumulostratus oder fedrige Haufenwolke, fedrige Schichtwolke und Schicht-Haufenwolke zusammen. Die eigentliche Regenwolke heißt nimbus. Der cirrocumulus führt den Namen der Schäfchen in der Volkssprache und scheint durch Winde in die Höhe gerissener und auch zerrissener cumulus zu sein. Schäfchen am Himmel bedeuten daher nicht selten Sturm. Die Höhe der Wolken geht wohl nie über zwei Meilen hinaus, ihre Masse dagegen mag ungefähr aus der Angabe geschätzt werden, daß die

jährliche Menge der atmosphärischen Niederschläge auf eine Schicht von 30 Zoll Höhe geschätzt wird, und umgekehrt die jährliche Verdunstung demnach eine die ganze Erde bedeckende Wasserschicht von 30 Zoll in die Form von Wolken übergehen macht. Ein Baum von mittlerer Größe soll an einem warmen Sommertage 50 Pfund Wasser ausdünsten, und das Mittelmeer 52800 Billionen Tonnen Wasser in einem Jahre dem Luftkreise als Wolken zuführen.

Wird die Wolke durch rasch aufsteigende Wasserdünste schwer, oder wird sie durch kalte Luftströme übersättigt, so fällt Regen herab, indem die kleinen Dunstbläschen sich gegenseitig anziehen, vergrößern, zu wahren Tropfen vereinigen und nun nicht mehr von der Luft getragen werden können. Oertliche Regen haben den Namen Strich- und Streifregen erhalten, andere über größere Landstriche verbreitete heißen Landregen. Der Fülle nach unterscheidet man von den gewöhnlichen Regen die Staubregen nach der geringen, die Platzregen und Wolkenbrüche nach ihrer großen und übergroßen Wassermenge, die sie auf die Erdoberfläche herabgießen. Gewitteregen sind sehr heftige Ergüsse, wenn die Ausgleichung des electrischen Gegensatzes zwischen den Wolken und der Erde stattfindet, minder heftig, wenn sie von Wolke zu zu Wolke geht, sehr hohe Gewitter führen gar keinen Regen zur Erde. Das Regenwasser ist chemisch rein, wie destillirtes Wasser; nur im Anfange führen die Niederschläge fremde Bestandtheile mit sich, Gase, Staub und dergleichen. Daher die Fruchtbarkeit der Sommer-, namentlich der Gewitterregen. Regen aus heiterm Himmel erklärt sich aus durch Winde fortgerissenen Regentropfen ferner Wolken oder aber durch das Schmelzen kleiner Eistheilen, die in höhern Gegenden der Atmosphäre nicht selten vorhanden sind, und dort zu Sonnenhöfen und Nebensonnen Veranlassung geben. Aehnlich sind Staub-, Getreide-, Schwefel- und Steinregen zu erklären, und der Blutregen bringt durch die Einwirkung des Windes ebenfalls emporgerissene kleine rothgefärbte flechtenartige Pflanzen von ihrer Geburtsstätte an andere Lagerstätten hin.

Während der Regen destillirtes Wasser gibt, liefert der

Schnee sublimirtes. Sobald nämlich die Wolken in hinlänglich kühle Luftschichten kommen, gelangen sie nicht als Tropfen sondern als Schneeflocken zur Erde, wenn zugleich die Luft an dieser eine niedrige Temperatur hat, so daß der oben gebildete Schnee nicht während des Falles schmilzt. Größere Flocken treten stets bei verhältnißmäßig geringer Kälte auf, während hohe Kältegrade kleine Flocken geben. Wenn in die Nähe großer Eisfelder ein feuchtwarmer Luftstrom anlangt, so schneit das Wasser aus demselben heraus, und ebenso entstehen unsere Schneestürme meist nur bei warmen und feuchten Südwestwinden, die ihre Feuchtigkeit in der Form des Schneees in den höhern und kalten Breiten abgeben. Wenn der gemeine Mann daher sagt, es ist zu kalt, es kann nicht schneien, so berichtet er eine wahre Thatsache, allein die Erklärung findet er nicht: es schneit nicht der Kälte halber nicht, sondern wegen des Mangels an Südwestwind; nördliche Winde geben bei uns keinen Schnee. Steigt demnach das Barometer bei fallendem Schnee, so deutet dies auf die Ablösung der Südwestwinde durch nord- und nordöstliche hin, das Barometer verkündet Kälte. Das Fallen des Barometers zeigt im Gegentheile wärmere Tage und möglichen Schneefall an.

Ist umgekehrt die Temperatur an der Oberfläche der Erde niedriger als die der Luft, so verwandelt sich das herabfallende Wasser in Eis, das sich als Glatteis an den Boden setzt. Es können auch mehr Schneeflocken zu kleinen Eiskörperchen von 2—3 Millimeter Dicke sich vereinen. Das geschieht vorzugsweise in den Uebergängen von der kalten zur wärmern oder der wärmern zur kalten Jahreszeit, wenn Stürme und Windstillen wechseln, so daß Kaemtz für die Graupelbildung einen ähnlichen Vorgang annimmt, als der ist, wenn Salze aus Auflösungen in kleinen Körnern statt in ausgebildeten Krystallen herauskommen, weil die Ruhelage der Auflösung gestört und die Anziehung nach gewissen Seiten hin unmöglich gemacht wurde. Der eigentliche Hagel ist von dieser Graupelbildung wohl zu unterscheiden, auf ihn kommen wir beim Gewitter.

An die bisher betrachteten Hydrometeore schließen sich Thau und Reif aufs engste an und sollen hier nur kurze Erwähnung

finden, wenn gleich die strahlende Wärme bei ihnen eine kleine Rolle spielt. Wenn in heitern Nächten nämlich die hervortretenden Gegenstände der Erdoberfläche wie niedrige Bäume, Sträucher, Gräser und dergl. durch Wärmestrahlung sich abkühlen, so wird die sie unmittelbar umgebende warmfeuchte Luft übersättigt, und muß ihre Feuchtigkeit zum Theil auf den kühlen Gegenständen tropfenförmig niederschlagen. Der Vorgang findet um so leichter statt, da die Lufttemperatur in der Höhe von 1 bis 2 Meter von der Erdoberfläche ab am höchsten ist, und sich nach der Erde hin um etwa $1^1/_2$ Grad mindert. Je größer der Unterschied der Tages- und Nachttemperatur ist, je heiterer der Himmel, je massenhafter der Thau, welcher in Zeiten der Dürre den Mangel an Regen theilweise ersetzen kann. Im Winter wird der Thau zu Reif.

35. Das Vorhandensein von Luftelectricität ist stets und überall nachweisbar schon allein durch den Ozongehalt der Atmosphäre, die sich an den mannigfaltigsten Sauerstoffverbindungen kund gibt, welche wie die Fäulniß und Verwesung thierischer und pflanzlicher Stoffe — hierher auch das Bleichen der Leinwand — niemals stattfinden könnten, wenn nicht der Sauerstoff durch electrische Strömungen in Ozon umgeformt wäre. Die Luftelectricität rührt offenbar von Temperaturdifferenzen her, die namentlich durch die hin- und herwogenden kalten und warmen Winde und durch Uebergänge des atmosphärischen Wassers in die verschiedenen Aggregatzustände, bei welchen Wärme frei oder gebunden wird, entstehen und nun eine neue Reihe von Erscheinungen hervorrufen. Das Gewitter ist der Wiederhersteller des gestörten electrischen Gleichgewichtes und die Gewitterwolke verhält sich wie ein großer Conductor, der alle Electricität aufgesammelt hat, und nun durch ihre Wirksamkeit auf benachbarte Wolken oder auf die Erdoberflächentheile, langgestreckte Bergeshöhen, Gebäude, Bäume und dergleichen ausübt. Die gewöhnlichen Gewitter unserer Gegenden entstehen, wenn bei dem Vordringen südlicher Winde durch nördliche eine rasche Verminderung ihrer ungleich temperirten Luftmassen erfolgt. Diese Gewitter gehören daher zu den Erscheinungen der Westseite. Ehe das Gewitter herauf-

kommt wird also ein südlicher Wind wehen, nachher ein nördlicher. Da aber der kältere Wind zuerst unten einfällt, und den vorher vorherrschend südlichen zuerst in die untern Gegenden der Atmosphäre verdrängt, was auch nachher in den obern geschieht, so wird unmittelbar vor der Gewitterwolke der kältere nördliche Wind herwehen, das Barometer während des Gewitters rasch steigen, und die Temperatur nach demselben sich bedeutend erniedrigen. Die Drehung des Windes erfolgt von Süden durch West nach Norden gemäß dem Drehungsgesetze. Die mit Westwind aufsteigenden cumulostratus bewegen sich daher mehr oder minder senkrecht auf den in der Höhe vorherrschenden cirrus und das gibt eines der bezeichnendsten Anzeichen eines herannahenden Gewitters, bei welchem daher wie Brandes' Beobachtungen der atmosphärischen Refraction gezeigt haben, die Temperaturabnahme nach der Höhe langsamer erfolgt als gewöhnlich. Da aber unmittelbar vor dem Gewitter zwei Winde einander gerade entgegenwehen, so wird hierdurch eine Windstille erzeugt, welche man die drückende Luft nennt — siehe indeß auch §. 11 — Die Umdrehung des Windes durch die Gewitterwolke und die nachfolgende Kälte sind daher nicht die Werke der Electricität, sondern diese tritt umgekehrt am stärksten hervor, wenn jene Bedingungen eines kräftigen Niederschlages vorhanden sind. Ein Gewitter, welches über eine lange Strecke verwüstend fortzieht, ist der am Himmel sich dunkel abzeichnende Weg eines kalten Luftstromes, welcher überall wo er in die warme Luft eindringt, den Prozeß des Niederschlags erneuert und daher die Wolke scheinbar unverändert erhält, die die Regen- oder Hagel-Massen herabsendet. Damit soll aber keineswegs gesagt sein, daß die durch den starken Niederschlag entstehende Verdampfungskälte für den weitern Fortgang der Erscheinungen nicht eine mitwirkende Ursache sein kann — im Gegentheil die Temperaturdifferenz wird dadurch merklich gesteigert, und die electrischen Erscheinungen müssen dadurch im höchsten Grade der Spannung der electrischen Gegensätze erfolgen. — Ueberhaupt wird es wohl oft schwer sein, für die erste Ursache des Gewitters, welche oft sehr lokal zu sein scheint, allgemeine Ursachen nachzuweisen. Die kleinste wirbelnde Be-

wegung kann der Anstoß zu einer Wolkenbildung werden, deren energische Schlußwirkung mit dem unscheinbaren Anfange in gar keinem Verhältniße steht. Die Bildung der Hagelwetter an den Stellen, wo die Gebirgsthäler sich in die Ebenen öffnen, zeigt, daß hier solche erste Ursachen überwiegend vorhanden sind, und der Einfluß der sogenannteu Wolkenscheiden auf den Zug des Gewitters beweist, daß die Lokalität auch für den Fortgang der Erscheinung von Bedeutung wird. (Physikalisches Lexicon, Artikel Gewitter.)

Gewitter, welche mit Ostwind aufsteigen, und überhaupt solche, die durch Eindringen eines warmen Luftstromes in einen kalten entstehen, kühlen die Luft nicht ab, ziehen langsamer und hängen deshalb oft schwer herüber, wie man zu sagen pflegt. Unter den Tropen wird das Gewitter durch den gerade aufsteigenden Strom erzeugt, und die Zeit desselben ist damit eine regelmäßig wiederkehrende, wie das schon mehrmals angeführt worden. Im Allgemeinen nimmt die Zahl der Gewitter mit zunehmenden Breiten ab, doch wirken auch andere Verhältnisse wie beim Regen mit. Die regenlose Zone ist fast gewitterlos, und Gleiches findet sich im Innern der Continente. In Italien sind durchschnittlich 40 Gewitter, in Deutschland 30, in den östlichen Ländern 10 bis 12 im Laufe des Jahres. Wo Winterregen überwiegt, kommen auch die Wintergewitter häufiger vor als die des Sommers, und Bergen hat auf 7 Gewitter im Winter nur 5 im Sommer. Der Tageszeit nach fallen die meisten Gewitter auf den spätern Nachmittag, weniger auf den Morgen. Herbst und Frühjahr sind die Jahreszeiten mit größerer Luftfeuchtigkeit, da die Atmosphäre im Sommer und Winter verhältnißmäßig am trockensten ist. Eine Folge ist, daß die Luftelectricität im Herbst und Frühjahr viel leichter zur Erde abgleitet, und also nicht zum Gewitter sich steigern kann. Ueber die Beschaffenheit der Luft- und Wolken-Electricität wollen wir nur anfügen, daß positive und negative Electricitäten bald hier bald dort wahrgenommen werden, und daß es nicht auf diesen Unterschied, wohl aber auf den Grad der electrischen Vertheilung ankommt. Im Allgemeinen gilt aber die Ansicht, daß die Sauerstoffmoleküle in Ozon und An-

tozon zerlegt werden, daß das Ozon sich mit den andern Stoffen als negativ electrisch verbinde, und das positive Antozon zurückbleibt, womit die vorherrschende positive Luftelectricität constatirt ist.

Es ist überhaupt noch viel Räthselhaftes bei allen diesen Erscheinungen, wiewohl sie mehr wie andere in ihren Ursprüngen klar gelegt sind. Schon der Blitz ist Ursache vieler Controversen geworden, und man hat Zickzack- oder Linienblitze von den Flächenblitzen unterschieden. Arago behauptet, auf 1000 Flächenblitze komme nur ein Linienblitz, und wenn in neuerer Zeit dieses Verhältniß auf 11 : 6 herabgemindert worden ist, so dürfte die letztere Angabe ebenso wie die erste übertrieben sein. Die Linienblitze sind diejenigen, welche von der Wolke zur Erde kommen, einen Zickzackförmigen, von der gegebenen Richtung häufig abspringenden, aber nicht selten bis 1000 Meilen langen Weg verfolgen, und ein bläuliches meistens oft grelles Licht haben. Der sie begleitende Donner ist laut und weithin rollend, oftmals verstärkt durch Zurückwerfungen von Gebirgs- und Wolkenwänden. Flächenblitze finden zwischen Wolke und Wolke statt, ihr Licht ist mehr gelblich, und der sie begleitende Donner nur leise verklingend oder gar nicht vernehmbar. Flächenblitze werden mit der zunehmenden Entfernung Wetterleuchten. Die Erklärnng des Donners ist nicht ganz leicht. Früher sagte man, daß der die Luft durchfahrende Blitz einen luftleeren Raum verursache, in den nun die andere Luft heftig hineinstürze und so das Geräusch und den Knall verursache, die nun zum ununterbrochenen langen Donner auf dem längern Wege des Blitzes sich umforme. Diese Erklärung scheint zu oberflächlich zu sein, und der luftleere Raum ist jedenfalls mit einem Fragezeichen zu versehen. Der Donner ist die Folge von Lufterschütterungen, die durch die electrischen Ströme selbst hervorgerufen werden. Die Formen des Donners sind lokalen Ursachen zuzuschreiben eben so wohl wie die Formen des Blitzes anders erscheinen, wenn sie zu dem Beobachter hin gerichtet als dann, wenn sie von ihm abgewandt sind.

Heftige Regengüsse, die nicht lange andauern, oder sogar sich häufig unterbrechen sind Gewitterregen, selbst dann, wenn

die eigentlichen electrischen Erscheinungen dabei nicht zum Vorschein kommen. Dahin stellt man namentlich die Platzregen. Eigenthümlicher sind die Hagelschläge, die gewöhnlich an sehr heißen Sommertagen in der Weise erfolgen, daß sehr tiefliegende Wolken von dunkelgrüner etwas ins röthliche spielender Farbe, mannigmal nur wenige 100 Fuß über der Erde, sich rasch durch eine sehr starke Abkühlung bilden, daß vollkommene Windstille eintritt, ein starkes Rauschen oft 10 bis 15 Minuten lang vernehmbar wird und nun der Hagel in der Form von Eiskörnern herniederprasselt, die oft einen Durchmesser von 4 Zoll erreichen. Spiller denkt sich die Bildung des Hagels durch zwei übereinander gelagerte ziemlich ebenmäßige Wolkenschichten veranlaßt, zwischen denen eine starke electrische Spannung durch die Temperaturdifferenz hervorgerufen und bedeutend vermehrt werde durch die freiwerdende Wärme in Folge der Bildung von Schneekrystallen, welche die Kerne der spätern Hagelkörner abgeben und sich allmälig vergrößern, während sie durch den electrischen Gegensatz zwischen den Wolken angezogen und abgestoßen werden. Die Erklärung ist nicht ungeeignet zur Aufhellung einger räthselhaften Punkte, und wenn sie an dieser Stelle Aufnahme gefunden, so soll damit ihre verhältnißmäßige Brauchbarkeit zugegeben werden, ohne ihr ganz und gar beizustimmen.

Wenn der Blitz zur Erde niederfährt, so schlägt er ein. Findet das an einer Stelle statt, die viel Feuchtigkeit enthält, so wird die Wirkung des Blitzes durch Ableitung vernichtet, im entgegengesetzten Falle tritt dieselbe im Falle einer ganz nahen Ausgangswolke durch Zertrümmerung und Zündung verderbenbringend hervor. Gegen solche Zerstörungen sucht man sich durch Blitzableiter zu schützen. Dieselben sind nach der Idee Franklin's eiserne aufgerichtete Stangen, die mit ihren Spitzen die höchsten Punkte der Gebäude bilden, und somit den Blitz auf sich ziehen, seine Wirkung aber durch Ableitung an den eisernen Leitstangen zu unschädlichen Punken der Erdoberfläche führen. Wenn eine Gewitterwolke nahe über irdische Gegenstände hinzieht, so wird in derselben nicht selten eine Vertheilung der Electricitäten bemerkt, die nach dem Fortgange der Wolke mit einem Entladungs-

schlage wieder aufgehoben wird. Man nennt diesen Schlag den Rückschlag zum Unterschiede von einem kalten Schlage, der bei einem nicht zündenden Blitze direct vorkommen soll. Man sagt, die Kraft des Schlages sei zu gewaltig, und darum werde er ein sogenannter kalter Schlag. Es ist das ein Irrthum. Der Volksmund spricht bei einem kalten Schlage stets von einem ersten Schlage, der durch den zweiten kalten ausgelöscht sei. Somit wird auch der kalte Schlag nur als ein Rückschlag zu betrachten sein, der außergewöhnlich kräftig ist, und deshalb dem gewöhnlichen Beobachter auffällt, während andere Rückschläge unbeachtet bleiben. In großer Nähe einschlagender Gewitter werden in senkrecht stehenden Eisenstangen, z. B. den Espagnolettstangen zum Verschluß der Fenster, mehr oder minder starke Ströme inducirt, und ein Fingerknöchel, der in unmittelbarer Nähe auf dem Fensterkopfe ruht, fühlt nicht selten einen Schlag, der einem von einer starken Leydner Flasche herrührenden gleichkommt. Schlägt der Blitz nicht in feuchten, sondern in sandigen Boden ein, so ist bei hinreichender Nähe der Gewitterwolke das Schmelzen des Sandes die unmittelbare Folge, es entstehen die bekannten Blitzröhren.

Auf dem Fort St. Elmo bei Neapel hat man häufig Gelegenheit, die Spitzen der Thürmchen Lichtbüschel ausstrahlen zu sehen. Es ist dieses dieselbe Erscheinung wie sie sich auf Conductoren von Electrisirmaschinen findet, wenn sie mit Spitzen versehen werden. Vorbedingungen ähnlicher Erscheinungen, die man unter dem Namen der Sanct-Elmsfeuer zusammenfaßt, sind relativ trockene Luft und größere Spannungen in der Luftelectricität. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß die sogenannten Irrlichter in dieselbe Kategorie gehören; was man sonst über dieselben fabelt, ist nicht exacten Beobachtungen entnommen und wir sind nicht im Stande, den Irrlichtern eine Existenz zuzuweisen, wenn es nicht ausströmende Electricität ist, die an den Büschen der Binsen und Gesträuche wahrgenommen wird.

36. Nordlichter, Polarlichter, sind Erscheinungen, die heftig auf die Magnetnadel einwirken, und demnach nicht ohne Weiteres mit den gewöhnlichen Gewittern zusammengestellt wer-

den können, wenn sie auch als Nordwetterleuchten erscheinen wollen, da unsere lokalen Gewitter keine Wirkung auf die Magnetnadel ausüben. Spiller gibt folgende Erklärung, die dem jetzigen Standpunkte unserer Kenntnisse von diesem Gegenstande zumeist entspricht. „Die Wärmedifferenz zwischen der Aequatorialzone und den Polarzonen bewirkt in der Atmosphäre die bekannte Doppelströmung, eine obere vom Aequator nach den Polen, die andere unten in den beiden Halbkugeln nach dem Aequator gerichtet. Das stattfindende seitliche Zusammentreffen an der Erdoberfläche der beiden untern Ströme aus beiden Halbkugeln (des Nordost- und des Südost-Passates) bringt in der Region der Kalmen die fast täglich erfolgenden heftigen electrischen Entladungen hervor; die nach den Erdpolen gerichteten obern Strömungen erzeugen bei ihrem Herabsinken in ähnlicher Weise eine Ausgleichung der vorzüglich durch die Bewegungen der verschiedenen Luftschichten hervorgebrachten Spannung, welche wenn sie in höhern, also luftverdünnteren Regionen der Atmosphäre stattfindet, sich nicht als Licht, sondern als ein weitverbreitetes Glimmlicht offenbart, das sich um so mehr von den Polen nach dem Aequator hin erstreckt, je weiter die untere kalte Luftströmung in geringere Breiten dringt, und um so höher erscheint, je näher es dem Aequator kommt. Es ist natürlich, daß die Nordlichter in unserm Winter häufiger sind als im Sommer, und im Sommer vorzüglich nur dann, wenn Nordwinde dauernd geherrscht haben. Der Blitz des gewöhnlichen Gewitters zeigt eine plötzliche Abgleichung (?) der electrischen Gegensätze durch eine relativ trocknere und dichtere Luft nach mehr verticalen Richtungen zwischen horizontalen Wolkenschichten oder einer Wolkenschicht und der Erdoberfläche, aber das Nordlicht ist der Akt der allmäligen Abgleichung der der Erdoberfläche angehörigen Ströme mit der Luftelectricität in höhern Regionen; es ist thermoelectrisches Glimmlicht in einer allmälig herabsinkenden aber wärmern Luftschicht, welches an sich selbst ruhig nach den höhern und relativ feuchtern Schichten der Atmosphäre ausströmt, aber durch die unter ihm unruhig wogenden Schichten schwankend und bisweilen wellenförmig erscheint, wenn nämlich die darunter befindliche

Dunstschicht, durch deren Beugung und Refraction das Licht verschiedene Farbentöne annimmt, in wogender Bewegung ist. Das Feuerroth des Nordlichtes ist ganz das Roth am positiven Ende des electrischen Eies. Die bogenförmige Gestalt und die nach obengehende Convergenz ist eine optische Erscheinung, deren Grund in der scheinbar sphärischen Gestaltung des Himmelsgewölbes liegt, und die nichts Auffallenderes hat, als wenn wir die Sonnenstrahlen durch Wolkenlücken nach der Erde hin mittelst der Dünste divergiren oder die Bäume einer Allee, in welcher wir stehen, nach der Ferne hin convergiren sehen. Der Winter ist überdieß einer in Flächen stattfindenden Ausgleichung der Electricität günstiger als der Sommer, welcher eine Vegetation hervortreibt, die die Electricität in unzähligen Spitzen ableitet.

Bei einer weniger intensiven Erscheinung mit einem weißlichen Glimmerlichte, dem Nordscheine nämlich, welchem ein Wolkenstreifen häufig fehlt, zeigt es sich recht auffällig, wie die electrische Ausgleichung durch ein phosphorescirendes und wogendes und pausenweise erscheinendes Licht mit dem Fortschreiten der Luft geschieht."

Zweiter Abschnitt.

Die übertragene Bewegung.

Erstes Kapitel.

Physikalisch-mathematische Entwicklungen.

Wenn der siedendem Wasser entströmende Dampf den Deckel der Kochgefäße abwirft oder wenn er den Kessel und die Gefäße, in denen er eingeschlossen und zu höhen Temperaturen gebracht wird, zersprengt, so sehen wir in diesen starken oder schwachen Wirkungen nur die allbekannte Erscheinung, daß Dampf als bewegende Kraft dient. Diese Bewegung nutzbar zu machen, ist Jahrhunderte hindurch die Aufgabe der Technik gewesen, und dieselbe ist in unsern Tagen so vollständig gelöst, daß kaum eine Art menschlicher Arbeit ohne die Dampfmaschine fertig gestellt wird. Die Probleme, welche man zu lösen hatte, bestanden in der Steigerung der bewegenden Dampfkraft und der Feststellung des Grades, bis zu welchem diese Steigerung geschehen dürfe, in der Umformung der ruck- oder stoßweisen, jedenfalls unterbrochenen Bewegung in eine beständige oder stätige, in der Uebertragung derselben auf verschiedene Richtungen, wohin auch die Umsetzung der fortschreitenden Bewegung in eine drehende und umgekehrt gehört, endlich in der Beschaffung von Sicherheitsmaßregeln, wodurch jedes Uebermaß der Kraft sich selbst vernichtet. Vor der Dampfkraft benutzte man den Druck des fallenden oder strömenden Wassers oder des Windes, jetzt ersetzt

man diese oftmals versagenden Kraftmittel, die jedoch stets den Vorzug der Billigkeit haben, wenigstens theilweise durch die Dampfkraft, um die Arbeiten ohne Unterbrechung fortführen zu können.

Der Bewegung eine andere Richtung geben, sie auf bestimmte einem gewissen Zwecke entsprechende Weisen sich vollziehen zu lassen ist die Sache der Maschinen, deren einfachste Bestandtheile stets Hebel und schiefe Ebene sind, welche deßhalb auch selbst einfache Maschinen genannt werden, im Gegensatze zu den zusammengesetzten, deren oft wunderbar verschlungener Bau nur eine stäte Wiederholung oder Umformung dieser beiden Elementartheile aufweist. Die Umformung des Hebels ist aber die Rolle, und die der schiefen Ebene die Schraube und in zweiter Linie der Keil.

2. Unter den verschiedenen Arten der Bewegung ist zunächst die fortschreitende, dann die drehende und endlich die pendelartig schwingende oder die periodische zu unterscheiden; bei ersterer legen alle Punkte des Körpers gleiche und parallele Wege zurück, bei der drehenden, die um einen Punkt oder um mehre in grader Linie, Axe, liegende Punkte bewirkt wird, beschreiben die einzelnen bewegten Punkte ungleiche aber ähnliche Wege, und in der periodischen Bewegung kehren dieselben Erscheinungen an denselben Orten nach bestimmten Zeiten wieder. Daß auch gewisse Bewegungen, wie die drehende und zugleich fortschreitende der Billard- und Kegelkugel, oder die periodisch und fortschreitende Wellenbewegung ins Auge zu fassen sind, versteht sich von selbst.

Dieses vorausgesetzt verstehen wir unter gleichmäßiger Bewegung eine solche, bei welcher in gleichen Zeiten gleiche Wege durchlaufen werden, bei welcher also die Geschwindigkeit eine constante ist, wenn wir Geschwindigkeit den Weg nennen, den ein Punkt in einer Secunde durchläuft. Als solche Bewegung fassen wir die Bewegungen von Menschen und Thieren auf, von Schiffen, von Winden und Stürmen, von abgeschossenen Kugeln, des Schalles in der Luft, des Lichtes im Weltenraume, des electrischen Stromes in einer Drahtleitung.

Als Zahlen von allgemeiner Giltigkeit führen wir an die Geschwindigkeit:

des schnellgehenden Mannes	1,8 Meter (2 Schritt = 5 Fuß)
eines gallopirenden Pferdes	4—5 Meter
von Eisenbahnzügen	8—14 „
von Schiffen	3—7 „
von Winden und Stürmen . . .	3—30—40 „
einer abgeschossenen Büchsenkugel	500 „
einer abgeschossenen 24pfündigen Kanonenkugel	800 „
des Schalles	333 „
des Lichtes	42000 Meilen
der Elektricität	62000 „

Ist t die Anzahl der Secunden, c die Geschwindigkeit und s der zurückgelegte Weg, so werden alle möglichen Fragen durch die Gleichung beantwortet

$$s = ct \dots. \qquad 1.$$

Drehende gleichmäßige Bewegungen sind die Axendrehung der Himmelskörper, die der Räder und Wellen an Maschinen und mehre andere. Ein Punkt des Aequators hat eine Geschwindigkeit von $\frac{5400}{24 \cdot 60 \cdot 60}$ Meilen oder $\frac{5400 \cdot 7500}{24 \cdot 60 \cdot 60}$ Meter [= 468 Meter]. In höhern Breiten ändert sich diese Geschwindigkeit, da die Radiens des Bewegungskreises kleiner wird, in einer Breite von 60^0 ist der Umfang nur $5400 \cdot \cos 60^0$* $= 5400 \cdot \frac{1}{2}$ d. h. die Geschwindigkeit nur noch 234 Meter. Wäre die Bewegung der Erde um die Sonne gleichmäßig, so würde sie eine Geschwindigkeit von circa 4 Meilen haben $\left[\frac{2\pi \cdot 20000000}{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}\right]$.

Bei dieser Art der Bewegung nimmt man einen Punkt heraus, und indem man ihm die Entfernung 1 von der Drehaxe beilegt, nennt man seine Winkelgeschwindigkeit u den Kreis-Bogen, den er in einer Secunde zurücklegt. Für jeden andern Punkt, dessen Entfernung r mal so weit von der Axe ist, wird dann die Winkelgeschwindigkeit ru sein. Ist nämlich φ der Drehungswinkel für die ähnlichen Bogen s_1 und s_2

* Siehe §. 4.

denen die Radien ϱ_1 und ϱ_2 entsprechen und $m = \frac{360^0}{\varphi}$, so ist $s_1 = \frac{2\pi\varrho_1}{m}$ und $s_2 = \frac{2\pi\varrho_2}{m}$ also auch $\frac{s_1}{s_2} = \frac{\varrho_1}{\varrho_2}$. Ist nun aber $s_1 = u$, so ist $\varrho_1 = 1$ und $\varrho_2 = r$, also $s_2 = ru$ oder allgemein der Weg eines Punktes in gleichmäßiger Drehung bei der Entfernung r von der Axe ist

$$s = ru \ldots \quad 2.$$

cos ist erklärt § 4.

Wenn z. B. ein Wasserrad von 5 Meter Durchmesser an seinem Umfange eine Geschwindigkeit von 3 Meter hat, so hat dasselbe einen Umfang von $2\pi \cdot \frac{5}{2}$ Meter, der in $\frac{5\pi}{3}$ Secunden durchlaufen wird, die Winkelgeschwindigkeit aber ist $\frac{3}{2\frac{1}{2}} = 1{,}2$ Meter. $[\frac{s}{r}]$ die Anzahl der Umläufe in einer Minute ist demnach $60 : \frac{5\pi}{3} = \frac{180}{5\pi} = 11{,}5$ ungefähr.

3. Von den ungleichmäßigen Bewegungen eines Punktes ist die gleichförmig beschleunigte oder gleichförmig verzögerte, wie sie beim freien Fall, bei senkrecht in die Höhe geworfenen Körpern vorkommt, diejenige, welche uns hier allein angeht. Nehmen wir einen in Ruhe befindlichen Punkt und geben demselben eine Beschleunigung γ für jede Secunde, so daß also dieselbe nach der 2. Secunde 2γ, nach der 3. 3γ, nach der t. γt ist, so ist dieses γt die erlangte Geschwindigkeit v und demnach

$$v = \gamma t \ldots \quad 3.$$

Der Weg findet sich leicht durch folgende Ueberlegung. Zwischen der Anfangsgeschwindigkeit o und der Endgeschwindigkeit γt muß es eine mittlere Geschwindigkeit $\frac{1}{2}\gamma t$ geben, die so beschaffen, daß ein Punkt durch sie mit gleichmäßiger Geschwindigkeit einen gleichen Weg s zurücklegen konnte, da bei der zunehmenden Geschwindigkeit am Ende der Bewegung so viel gewonnen werden muß, als im Anfange verloren gegangen war; oder zwei Geschwindigkeiten in gleichen Zeitmomenten vom Anfange und Ende

der Bewegung müssen sich zur Geschwindigkeit γt ergänzen, so daß $o + \gamma t$ am Anfang und Ende $= \frac{1}{2}\gamma t + \frac{1}{2}\gamma t$ in der Mitte der Bewegung ist. Der mit der gleichmäßigen Geschwindigkeit $\frac{1}{2}\gamma t$ zurückgelegte Weg ist aber $s = \frac{1}{2}\gamma t \cdot t$ also ist auch

$$s = \frac{1}{2}\gamma t^2 \ldots \quad 4.$$

die Gleichung für die gleichförmig beschleunigte Bewegung. War der Punkt anfänglich nicht in der Ruhelage, sondern hatte er eine Geschwindigkeit V, die ihm für die Dauer der beschleunigenden Krafteinwirkung verblieb, so ist offenbar $v = V + \gamma t$ und $s = Vt + \frac{1}{2}\gamma t^2$. Wenn der Körper in die Höhe geworfen wird, so nimmt die anfänglich ertheilte Geschwindigkeit V allmählig ab, V und γ sind mit entgegengesetzten Vorzeichen zu versehen; für $v = o$ ist also $V - \gamma t = o$ oder $t = \frac{V}{\gamma}$ d. h. der Körper steigt $\frac{V}{\gamma}$ Secunden lang einen Weg $s = \frac{V^2}{2\gamma}$ [$s = V \cdot \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{2}\gamma \frac{V^2}{\gamma^2}$]. Der Büchsenkugel ist z. B. eine Geschwindigkeit von 500 Meter zugeschrieben, für den auf die Erde fallenden Körper ist $\gamma = 10$ ungefähr, also ist $t = \frac{500}{10} = 50$ und $s = \frac{250000}{20} = 12500$ Meter.

Wie in diesem Beispiele schon angedeutet, ist der wirkliche freie Fall durch die Formeln 3 und 4 erledigt, wenn in denselben γ den Werth 9,808 ... Meter erhält, für welchen man nach Uebereinkunft in den Rechnungen die Abkürzung g gebraucht; in nicht genauen Rechnungen setzt man $g = 10$. Auch der senkrechte Wurf ist erledigt, und es bleiben nur der wagerechte und geneigte Wurf zu besprechen. Für den wagerechten Wurf gilt die Bemerkung, daß während eine Büchsenkugel etwa in t Secunden von dem Anfangsorte $500\,t$ Meter sich entfernt, sie zugleich auch in Folge der Einwirkung der Schwere zu Boden fällt. Würde sie also in einer Höhe von 40 Meter abgeschossen, so ist $40 = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot t^2$ oder $t = \sqrt{\frac{40}{5}} = 3$ ungefähr. Die auf einer Höhe von 40 Meter wagerecht abgeschossene Büchsenkugel schlägt also in 1500 Meter Entfernung in den Boden ein.

4. Nimmt man auf einen Schenkel des Winkels φ zwei Punkte A und B an und fällt von diesen auf den andern wagerechten Schenkel zwei Senkrechte AC und BD, so nennt man bekanntlich CD die Projektion von AB und $\frac{CD}{AB}$ den Cosinus φ, während $\frac{BD - AC}{AB}$ der Sinus φ heißt. (Abkürzend schreibt man $\cos\varphi = \frac{CD}{AB}$ und $\sin\varphi = \frac{BD - AC}{AB}$, und im rechtwinklichen Dreieck ABC, in welchem AB die Hypotenuse und der Winkel an $A = \varphi$ ist, hat man $\frac{AC}{AB} = \cos\varphi$, $\frac{BC}{AB} = \sin\varphi$ zu denen man noch $tng\,\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \frac{BC}{AC}$ als Tagentenformel hinzufügt.)

Zur Auflösung des Wurfproblems zeichne ich eine wagerechte Strecke AB und über derselben einen (Parabel-) Bogen, dessen höchster Punkt C senkrecht über der Mitte D von AB liegen soll. An den Bogen lege ich in A eine berührende Grade AL an, in der der Punkt E durch CD bestimmt ist, und ziehe noch die auf AB senkrechte Grade KFG mit den Punkten K in AB zwischen A und D, F in dem Bogen und G in der Graden AL. Endlich fällt man FN senkrecht auf DC. Wenn nun AG die Länge des Weges bezeichnet, den eine Kugel mit der Geschwindigkeit V gleichmäßig zurücklegt, so wird ihn die Fallbewegung während derselben Zeit um GF herabziehen, der Ort der Kugel also F in der krummen Linie $AFCB$ sein, sofern die Zeit t verstrichen ist. Ist $AK = x$ und $KF = y$ so hat man $x = AG\cos\varphi$ und $y = AG\sin\varphi - GF$, wenn noch Winkel $LAB = \varphi$ gesetzt wird. Es ist aber $AG = Vt$ und $GF = \frac{1}{2}gt^2$, also folgt $x = Vt\cos\varphi$ oder $t = \frac{x}{V\cos\varphi}$ und $y = Vt\sin\varphi - \frac{1}{2}gt^2$ oder $y = \frac{V\sin\varphi\cdot x}{V\cos\varphi} - \frac{1}{2}g\frac{x^2}{V^2\cos^2\varphi}$ d. h.

$$y = tng\,\varphi\cdot x - \frac{g}{2\,V^2\cos^2\varphi}\cdot x^2 \ldots \qquad 5.$$

In dem Punkte B ist $y = o$ also $o = tng\,\varphi \cdot x - \frac{g x^2}{2 V^2 cos^2 \varphi}$ $= x\,(tng\,\varphi - \frac{g x}{2 V^2 cos^2 \varphi})$ woraus auch 1. $x = o$ zur Bestimmung des Punktes A und 2. zur Bestimmung von B die Gleichung $AB = x = \frac{2 V^2 cos^2 \varphi\, tng\,\varphi}{g} = \frac{2 V^2 cos\,\varphi\, sin\,\varphi}{g}$ $\left[\frac{V^2 sin\,2\varphi}{g}\right]$. Dieses so festgestellte x nennt man die Wurfweite w. Der höchste Werth, den ein Sinus annehmen kann, ist 1, und dafür der Winkel $= 90^0$; ist also $\varphi = 45^0$, so ist w ein Maximum, und das ihr entsprechende t nach der Formel $t = \frac{x}{V\,cos\,\varphi}$ ist nun $t = \frac{2 V^2 cos\,\varphi\, sin\,\varphi}{g\,V\,cos\,\varphi} = \frac{2 V\,sin\,\varphi}{g}$

Für $x = \frac{w}{2} = \frac{V^2 cos\,\varphi\, sin\,\varphi}{g.}$ ist $y = DC = h$, erreicht somit die Kugel die höchste Höhe und es folgt dann $h =$ $tng\,\varphi \cdot \frac{V^2 cos\,\varphi\, sin\,\varphi}{g} - \frac{g}{2 V^2 cos^2\varphi} \cdot \frac{V^4 cos^2\varphi\, sin^2\varphi}{g^2} = \frac{V^2 sin^2\varphi}{g}$ $- \frac{1}{2} \frac{V^2 sin^2\varphi}{g}$ oder $h = \frac{V^2 sin^2\varphi}{2 g}$. Ist endlich $CN = \xi$ und $NF = \eta$, so folgt $x = \frac{w}{2} - \eta$ und $y = h - \xi$, welche Werthe in Gleichung 5 eingesetzt dieselbe aufgehen lassen in

$$\eta^2 = \frac{2 V^2 cos^2\varphi}{g} \xi \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 6.$$

was die Gleichung der gewöhnlichen Parabel ist. Für die Büchsenkugel ist $V = 500$ und soll $\varphi = 45^0$, zugleich die Kugel gegen die Masse der Erde als verschwindend klein angesehen werden, so ist $w = \frac{250000}{10} = 25000$ Meter und $h =$ 6250 Meter.

5. Es kommt nun auf den Uebergang von immateriellen Punkten auf Massensysteme an, und da muß man zwischen momentanen oder kurz andauernden und zwischen constanten oder stetig wirksamen Kräften unterscheiden. Im Falle des Statt-

findens von Momentankräften ist es aus sich selbst klar, daß bei gleichen Massen die doppelte Kraft nur die doppelte Geschwindigkeit verleihen kann, und daß für gleiche Geschwindigkeiten die doppelte Masse die doppelte Kraft erfordert. Sind demnach K_1 und K_2 zwei Kräfte, V_1 und V_2 die entsprechenden Geschwindigkeiten, m_1 und m_2 die Massen, so ist, wenn $m_1 = m_2$, auch $\frac{K_1}{K_2} = \frac{V_1}{V_2}$ und ebenso für $V_1 = V_2$, $\frac{K_1}{K_2} = \frac{m_1}{m_2}$. Es setzt sich demnach nach der bekannten Regel zusammen

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{m_1\ V_1}{m_2\ V_2}$$

Ist K_2 die Einheit der Kraft für die Einheit der Geschwindigkeit V_2 und die Einheit der Masse m_2, so ist $K_1 = m_1 \cdot V_1$ oder allgemein

$$K = m\ V$$

die Bewegungsgröße für Momentankräfte.

Was aber bei diesen die Geschwindigkeit, das ist bei continuirlichen oder constanten Kräften die Beschleunigung γ. Daher ist $K = m\ \gamma$ oder $m = \frac{K}{\gamma}$. Beim freien Falle ist K das Gewicht G und $\gamma = g$, also ist stets

$$m = \frac{G}{g} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad 7$$

Die Masse eines 50 Kilogramm schweren Körpers ist also $m = \frac{50}{10} = 5$. Auf der Sonne ist die Beschleunigung $= 28\ g$, auf dem Monde $= \frac{1}{6}\ g$ oder resp. 280 und $1,666 \cdots [= 1,(6)]$. Da die Masse überall dieselbe bleiben muß, so wiegen 50 Kilogramm auf der Sonne $= 50 \cdot 28$ Kilogramm $= 1400$ Kilogramm und auf dem Monde $\frac{50}{6} = 8,(3)$ Kilogramm, weil umgekehrt $5 = \frac{1400}{28.10}$ und $5 = \frac{8,(3)}{\frac{1}{6} \cdot 10} = \frac{8,(3)}{1,(6)}$.

Wenn man die constante Kraft kennen will, welche einem Frachtwagen von 4000 Kilogramm auf horizontaler glatter Bahn innerhalb $^1/_2$ Minute = 30 Secunden aus dem Zustande der

Ruhe heraus eine Geschwindigkeit von 5 Metern ertheilt, so ist nach Formel 3: $v = \gamma t$ oder da $\gamma = \frac{K}{m} = \frac{gK}{G}$, so folgt, weil K unbekannt ist, $5 = \frac{10\,x}{4000} \cdot 30$ d. h. $x = 66,(6)$.

Fragt man nach der Geschwindigkeit und dem Wege eines Körpers von 3000 Kilogramm, der von einer constanten Kraft von 60 Kilogramm 12 Secunden lang auf horizontaler Bahn fortgeführt wird, wenn zugleich die Reibung, die $\frac{1}{200}$ des Gewichtes sein soll, Berücksichtigung erfährt, so muß die Kraft 60 Kilogramm zunächst eine entgegenstehende Kraft $\frac{3000}{200} = 15$ überwinden, so daß nur 45 Kilogramm als wirksam übrig bleiben, es ist dann $v = \frac{K}{\frac{G}{g}} \cdot 12 = \frac{45}{\frac{3000}{10}} \cdot 12 = 1,8$ Meter und ebenso

$$s = \tfrac{1}{2}\,\gamma t^2 = \tfrac{1}{2} \cdot \frac{45}{\frac{3000}{10}} \cdot 12^2 = 10,8 \text{ Meter.}$$

Wenn endlich eine 24pfündige Kanonenkugel $^1/_{300}$ Secunde im Laufe verweilt, dann ist die Kraft des explodirenden Pulvers bei der bekannten Geschwindigkeit von 800 Meter, da 24 Pfund = 12 Kilogramm und $\frac{12}{10} = 1,2$ durch die Gleichung bestimmt $800 = \frac{x}{1,2} \cdot \frac{1}{300}$ oder $x = 288000$ Kilogramm.

Wenn sich ferner eine Kraft K in ihrer Richtungslinie s Meter fortbewegt, so ist die geleistete Arbeit $= K5$ Kilogrammmeter $= Ks$ $K{=}M$, von denen 75 auf eine Pferdekraft gehen, da man annimmt, daß ein Pferd bei achtstündiger Arbeit in jeder Secunde 75 Kilogramm 1 Meter hoch heben kann. Diese Arbeitswirkung Ks wird aber nach der Zeit geschätzt werden müssen, und man setzt demnach $\frac{Ks}{t} = E$ und nennt E den Effect der Arbeit. Wenn aber die Richtungslinie der Kraftwirkung mit

dem wirklichen Wege einen Winkel φ bildet, so kommt sie nur theilweise zum Effect, der dann $= \frac{K \cdot s \cdot \cos\varphi}{t}$ gesetzt wird. (Siehe unten § 8.) So ist die Arbeitswirkung eines 5 Meter hohen Wasserfalles, der in jeder Secunde 1500 Kilogramm Wasser liefert = 7500 *K-M* = 100 Pferdekräfte. Eine Dampfmaschine aber, deren Kolben einen Radius von 20 cm und einen Druck von 4 Atmosphären hat, wirkt zunächst mit einer Kraft von $4 \cdot 1{,}0328$ für jeden Quadratcentimeter*, deren sind aber $\pi \cdot 20^2 = 400 \cdot 3{,}14 = 4 \cdot 314$ vorhanden, und somit ist die wirkende Kraft $= 16 \cdot 1{,}0328 \cdot 314$. Wenn nun der Kolben in jeder Secunde 1,5 Meter zurücklegt, so ist der Effect $\frac{16 \cdot 1{,}0328 \cdot 314 \cdot 1{,}5}{75}$ Pferdekraft = 104 Pferdekraft ungef.

Für wirkliche Körper ist der durchlaufene Weg 5 nach dem des Schwerpunktes zu schätzen. Die mathematische Bestimmung desselben ist, wenn auch in einigen Fällen leicht, doch zumeist eine Aufgabe der höhern Rechnung, die praktische Ausführung kommt darauf hinaus, den Schnittpunkt zweier Schwerlinien zu bestimmen. Wenn nämlich ein Körper aufgehängt wird, so geht das Loth durch ihn hindurch, ebenso wenn das Aufhängen in einem zweiten Punkte geschieht; beide Lothe schneiden sich im Schwerpunkte.

6. Wenn vorhin $v = \gamma t$, γ aber $= \frac{K}{m}$, also $v = \frac{K}{m} t$ und $s = \frac{1}{2} \frac{K}{m} t^2$, so ist $Ks = \frac{K^2 t^2}{2m}$ oder durch Einführung von v endlich $Ks = \frac{mv^2}{2}$.

Das Produkt $\frac{mv^2}{2}$ nennt man die lebendige Kraft, und zur Erläuterung dient die folgende Ueberlegung. Wenn ein einfacher

---

* Hier ist die Druckhöhe des Quecksilbers auf einen Quadratcentimeter 760mm = 76cm, also der Inhalt = 76 Kubikcentimeter; jedes Kubikcentimeter Masse = 1 Gramm und Quecksilber 13,59mal schwerer. 76 . 13,59 Gramm = 1032,84 Gramm = 1,0328 Kilogramm.

Druck durch ein ruhendes Gewicht etwa ausgeübt wird, so ist die Wirkung offenbar geringer, als wenn das Gewicht vorher in Bewegung gesetzt worden war. Eine in Bewegung gesetzte Masse nimmt die ganze Arbeitswirkung, durch welche sie bewegt wurde, in sich auf und ist nun im Stande, dieselbe zu ersetzen und alle Widerstände aufzuheben. Daher der Name lebendige Kraft. Wenn ein 2 Pfund = 1 Kilogramm schwerer Hammer, dessen Masse also $\frac{1}{10}$ ist, mit einer Geschwindigkeit von 10 Metern auf einen Nagel trifft und ihn 1^{cm} in hartes Holz hineintreibt, so ist offenbar die lebendige Kraft des Hammers $= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} \cdot 10^2 =$ 5 *K-M*; außerdem ist *Ks* während der Ruhelage auf dem Nagel und der Zeit des Eindringens in das Holz = 1 Kilogramm · 1^{cm} = 1 · 0,01 *K-M*, somit die ganze Kraft 5,01 *K-M*. Nennen wir nun die Kraft eines ruhenden Gewichtes x für den Weg 0,01 Meter, so ist für dieselbe Arbeit

$$0{,}01 \cdot x = 5{,}01 \text{ d. h. } x = 501.$$

Eine ruhende Kraft von 501 Kilogramm bewirkt also dasselbe was 1 Kilogramm bewirkt, wenn dasselbe mit einer Geschwindigkeit von 10 Meter ankommt.

Descartes hatte als das richtige Maß der Kräfte das Product $m \cdot v$ angesehen, wogegen Leibnitz auf die lebendige Kraft $\frac{1}{2} m v^2$ zurückging. Der daraus hervorgegangene Streit ist mit großer Erbitterung lange fortgeführt, endlich aber als nichtig anerkannt worden. Zwei Kräfte, K_1 und K_2, haben für gleiche Wege $\frac{K_1 s}{K_2 s} = \frac{\frac{1}{2} m_1 v_1^2}{\frac{1}{2} m_2 v_2^2}$ oder $\frac{K_1}{K_2} = \frac{m_1}{m_2} \frac{v_1^2}{v_2^2}$, und für gleiche Zeiten sind $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{v_1}{v_2}$ und da $\gamma = \frac{K}{m}$, so folgt $\frac{K_1}{m_1} : \frac{K_2}{m_2} = \frac{K_1}{K_2} \frac{m_2}{m_1} = \frac{v_1}{v_2}$ daraus aber $\frac{K_1}{K_2} = \frac{m_1}{m_2} \frac{v_1}{v_2}$.

Hat man nun ein System von materiellen Punkten mit der Anfangsgeschwindigkeit v_1 v_2, v_3 und den Endgeschwindigkeiten V_1, V_2 V_3 während die Massen m_1 m_2, m_3 sind, so muß

sein $w_1 = \frac{m_1 V_1^2 - m_1 v_1^2}{2}$, $w_2 = \frac{m_2 V_2^2 - m_2 v_2^2}{2}$ u. s. w. wenn unter w_1 und $w_2 \cdots$ die wirklichen Kraftleistungen verstanden werden.

Ist die Summe aller $w = 0$, so ist offenbar ein bewegtes Massensystem als einwirkend auf ein träges, und in ihm alle Widerstände aufhebend zu denken; wenn aber die Summe der Wirkungen w nicht gleich 0, so bewegt sich die träge Masse mit einer Kraft, die als Ueberwucht zu betrachten ist. Die im trägen Massensystem wirkenden Widerstände sind gewöhnlich Reibungshindernisse, und die hieraus entstehende Wärme ist umgeformte Kraftäußerung. Wenn ein Hammer auf den Ambos niederfällt, so geht seine lebendige Kraft in den Ambos über, und erregt die zitternde Bewegung seiner Massentheilchen, der Ambos wird warm und je mehr, je weniger er in die ihn tragende Erde einsinken kann. Die von den Sonnenstrahlen herrührende Wärme ist die Ursache der Molekularbewegungen in den Pflanzen, die von ihnen getroffen werden. Diese Bewegungen sind durch die große lebendige Kraft der Strahlen so stark, daß die von den Pflanzen aufgenommene Kohlensäure in ihre Bestandtheile, in Kohlenstoff- und Sauerstoff-Atome zerfallen muß. Im menschlichen Körper ist die Arbeitsleistung der bewegten Muskelfaser herzuleiten aus den mit ungeheurer Schnelligkeit erfolgenden Schwingungen der Nerven-Atome, aus denen Wärme und electrische Strömungen und somit Ozonisirung des aus der Luft eingeathmeten Sauerstoffs hervorgehen. Deshalb hat der zusammengezogene arbeitende Muskel in seinen Säften keinen Sauerstoff mehr, wohl aber der ruhende, erschlaffte Muskel, der keine Arbeit verrichtet hat und dieser zeigt in seinem venösen Blute noch $7^1/_2\%$ Sauerstoff, welcher nicht ozonisirt ist. Auf die Nervenbewegung ist die constante Bluttemperatur des menschlichen Körpers hauptsächlich zurückzuführen. Die Summe der durch das animalische Leben und die Arbeitsprocesse verzehrten Kräfte ist fast überall dieselbe.

Geht man zu Drehbewegungen über, so ist für einen Körper mit der Winkelgeschwindigkeit u und den Massenelementen m_1,

$m_2, m_3 \ldots$ und den Entfernungen $r_1, r_2, r_3 \cdot\cdot$ von der Drehaxe die lebendige Kraft L durch die Gleichung gegeben

$$L = \tfrac{1}{2} m_1 v_1{}^2 + \tfrac{1}{2} m_2 v_2{}^2 + \tfrac{1}{2} m_3 v_3{}^2 + \ldots$$

Nun ist aber nach Gleichung 2. $v = ru$, also

$$2L = u^2 \{m_1 r_1{}^2 + m_2 r_2{}^1 + m_3 r_3{}^2 + \cdots\} \quad \text{oder}$$

$$2L = u^2 \Sigma m r^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8.$$

Man nennt $\Sigma m r^2$ also die Summe der Produkte aus den Massen in die Quadrate der Entfernungen das Trägheitsmoment, und die doppelte lebendige Kraft ist gleich dem Produkte aus dem Quadrate der Winkelgeschwindigkeit und dem Trägheitsmomente. Dasselbe bedeutet aber eine gedachte Masse, welche in der Entfernung 1 von der Drehaxe angebracht bei gleicher Winkelgeschwindigkeit dieselbe lebendige Kraft erhält, wie das ganze sich drehende Massensystem. Ist aber M eine Masse in der Entfernung R welche dieselbe Wirkung haben soll wie das ganze Massensystem, so ist

$$2L = u^2 M R^2 = u^2 \Sigma m r^2 \text{ woraus folgt } M = \frac{\Sigma m r^2}{R^2} \cdot \ldots 9.$$

Die in dieser Gleichung ausgesprochene Beziehung nennt man auch die Reduction der Massen und um sie dreht sich die ganze Lehre von den Trägheitsmomenten. Je weiter nämlich die Hauptmasse von der Drehaxe entfernt, je größer also das Trägheitsmoment ist, desto größer ist das Beharrungsvermögen des Körpers, so daß der Name Trägheitsmoment hiermit gerechtfertigt ist. Es ist nicht schwer für einige elementare Fälle das Trägheitsmoment zu berechnen, dieselben können vorkommenden Falles in den Lehrbüchern nachgeschlagen werden, hier soll nur historisch bemerkt sein, daß das Trägheitsmoment eines Körpers in Bezug auf irgend eine Axe, die der durch den Schwerpunkt gehörende Drehungsaxe parallel ist gefunden wird, wenn man zu dem Trägheitsmomente dieser Axe das Produkt aus der Masse in das Quadrat der Entfernung beider Axen addirt. Ist also, wie leicht zu finden, das Trägheitsmoment einer überall gleichschweren Stange von der Länge l und der Masse $m = \frac{1}{3} m l^2$, so ist davon das Produkt $m. (\frac{1}{2} l)^2 = \frac{m l^2}{4}$ zu subtrahiren um

das Trägheitsmoment für die Axe zu finden, die parallel der erstern durch den Mittelpunkt der Stange d. h. durch ihren Schwerpunkt geht; dasselbe ist demnach $\frac{1}{3} m l^2 - \frac{1}{4} m l^2 = \frac{1}{12} m l^2$.

Ist u die Winkelgeschwindigkeit, α ihre Beschleunigung, so ist nach t Secunden $u_t = u + \alpha t$ und mithin der durchlaufene Bogen $\sigma = ut + \frac{1}{2} \alpha t^2$. Da nun die Arbeitswirkung gleich der Differenz der lebendigen Kräfte am Anfange und Ende ist und $L = \frac{u^2 \Sigma mr^2}{2}$, so entsteht

$$w = \frac{\Sigma mr^2}{2} \{u_t^2 - u^2\} = \Sigma mr^2 \cdot \alpha \sigma \cdots \qquad 10.$$

7. Elastische Körper sind diejenigen, welche ihr Volumen, sofern es durch eine von außen einwirkende Kraft seiner Größe oder seinem Orte nach geändert ist, ganz und voll wieder herstellen; unelastische Körper zeigen ein gegentheiliges Verhalten. In der Natur der Sache liegt es, daß diese Difinitionen niemals, wenn nicht bei den vollkommen elastischen Gasen, sich realisirt finden, und man deshalb von Elasticitesgrenzen sprechen muß, innerhalb derer die Wiederherstellung des Raumes nach geschehener Abänderung bewirkt wird. Dieselben sind bei elastischen Körpern sehr weit von einander, bei unelastischen Körpern sehr nahe an einander gelegen. Als elastische Körper sehen die Künste und Gewerbe an: Metalldrähte, Darmsaiten, Haare und Sehnen von Thieren, die zusammengedrehte Pflanzenfaser, Stahl- und Holzstäbe, Metall- und Glasscheiben, Kugeln von Kautschuck, Elfenbein, Knochen, Fischbein. Expansive Elasticität findet statt nach dem Zusammendrücken, attractive nach dem Ausdehnen und Torsionselasticität nach der durch Drehung bewirkten Veränderung des Volumens. An dieser Stelle handelt es sich nun um die Stoßbewegungen der Körper; man unterscheidet den centralen Stoß von dem excentrischen und den graden von dem schiefen. Geht die Bewegungsrichtung durch die Schwerpunkte beider Körper, so ist der Stoß central, gegentheils excentrisch; ist die Berührungsebene senkrecht auf der Bewegungsrichtung, so hat man den graden Stoß, andernfalls den schiefen.

Wenn nun zwei unelastische Körper mit den Massen m_1 und

m_2 und den Geschwindigkeiten c_1 und c_2 auf einander stoßen, so ist nach dem Grundsatze, daß Wirkung und Gegenwirkung einander gleich sind, daß also was in diesem Falle als Verlust des ersten Körpers sofort als Geschwindigkeitsgewinn beim zweiten hervortreten muß, offenbar die gemeinschaftliche Geschwindigkeit c nach dem Zusammentreffen

$$C = \frac{m_1 c_1 \pm m_2 c_2}{m_1 + m_2} \quad . \; . \; . \; . \qquad 11.$$

je nachdem beide Körper nach derselben Seite oder nach entgegengesetzter in der Richtung der Bewegung fortschreiten. Mit dieser Geschwindigkeit C setzen nun beide Körper den Weg zusammen fort, ohne daß eine Trennung eintreten kann. Die lebendigen Kräfte sind hier der Reihe nach $\frac{m_1 c_1^2}{2}$, $\frac{m_2 c_2^2}{2}$, $\frac{(m_1 + m_2) C^2}{2}$. Der Verlust an lebendiger Kraft oder die Kraft, welche die störenden Wirkungen des Zusammenstoßes zum Ausdruck bringt ist demnach:

$$\frac{m_1 c_1^2 + m_2 c_2^2}{2} - \frac{(m_1 c_1 + m_2 c_2)^2}{2\,(m_1 + m_2)} = \frac{m_1 m_2 (c_1 - c_2)^2}{2\,(m_1 + m_2)}$$

Wenn z. B. zwei Locomotiven mit den bezüglichen Gewichten von 20000 und 16000 Kilogrammen und den Geschwindigkeiten von 14 und 12 Metern auf einander stoßen, so ist die zertrümmernde Kraft $= \dfrac{\dfrac{20000}{10} \cdot \dfrac{16000}{10}\, 2^2}{2\left\{\dfrac{20000}{10} + \dfrac{16000}{10}\right\}} = 1777,(7)$ $K\text{-}M.$

Elastische Körper prüft man auf den Grad ihrer Elasticität. Wenn nämlich ein solcher von der Höhe h fallend nur bis zur Höhe h_1 wieder aufsteigt, so sind nach den Fallgesetzen die zugehörigen Geschwindigkeiten $\sqrt{2\,gh}$ und $\sqrt{2\,gh^1}$ also ihr Verhältniß $= \sqrt{\dfrac{h_1}{h}} = e$ dieses e heißt der Elasticitätsmodul. Bleiben nun die eben gewählten Bezeichnungen und nehmen wir an c_1 sei größer als c_2 nennen dabei c_a und c_b die Geschwindigkeiten nach dem Stoße, während β die mittlere Geschwindigkeit andeuten soll, die bei un-

elastischen Körpern stattfinden würde, so ist $c_1 > \beta > c_2$ oder $\beta = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2}{m_1 + m_2}$.

Die Geschwindigkeit des Körpers m_1 während des zusammendrückenden Stoßes ist $c_1 - \beta$ und für die Wiederherstellung $e(c_1 - \beta)$ somit ist der Geschwindigkeitsverlust $= (1 + e)(c_1 - \beta)$ und demnach $c_a = c_1 - (1 + e)(c_1 - \beta)$.

Der zweite Körper m_2 gewinnt an Geschwindigkeit und zwar in derselben Weise beim Zusammendrücken $\beta - c_2$ und beim Wiederherstellen $c(\beta - c_2)$ im Ganzen also $(e + 1)(\beta - c_2)$. So entsteht $c_b = c_2 + (e + 1)(\beta - c_2)$. Die gewählten Zeichen vor c_2 gelten für den Fall der Bewegung nach derselben Seite mit m_1, andernfalls muß das Vorzeichen — dem c_2 gegeben werden. Schafft man nun β fort und setzt $e = 1$ so ergibt sich nach leichten Rechnungen:

$$\left.\begin{aligned} c_a &= \frac{(m_1 - m_2)\, c_1 + 2\, m_2\, c_2}{m_1 + m_2} \\ c_b &= \frac{(m_2 - m_1)\, c_2 + 2\, m_1\, c_1}{m_1 + m_2} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 12.$$

Ist $m_1 = m_2$ so wird $c_a = c_2$ und $c_b = c_1$ d. h. zwei gleiche vollkommen elastische Körper vertauschen ihre Geschwindigkeiten mit einander; ist zugleich $c_2 = 0$, so ist $c_a = 0$ und $c_b = c$, d. h. trifft ein bewegter elastischer Körper einen gleich großen ruhenden, so bleibt nach dem Stoße der erste in Ruhe, während der ruhende sich mit der Geschwindigkeit des bewegten fortbewegt. Ist endlich $c_2 = c_b = 0$, so muß m_2 als unendlich groß, als feste Wand etwa betrachtet werden, dann ist aber

$$c_a = \frac{(m_1 - m_2)\, c_1 + 2\, m_2\, c_2}{m_1 + m_2} = \frac{\left(\frac{m_1}{m_2} - 1\right) c_1 + 2\, c_2}{\frac{m_1}{m_2} + 1},$$ und es

folgt, weil $\frac{m_1}{m_2}$ als unendlich klein, c_2 aber 0:

$$c_a = -\, c_1$$

d. h. ein mit der Geschwindigkeit c_1 an eine feste Wand stoßen-

der Körper kehrt beim senkrechten Aufstoße mit derselben Geschwindigkeit zurück.

Ueber den centralen schiefen Stoß gegen eine feste Wand mit dem Gesetze, daß der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel sein müsse siehe weiter unten die dritte Abtheilung; über den excentrischen Stoß nur die Bemerkung, daß derselbe zwei Bewegungen erzeugt, eine fortschreitende des Schwerpunktes und eine drehende um denselben. Das Weitere muß in größern Werken nachgesehen werden.

8. Die oben entwickelten und durch einfache Ueberlegung festgestellten Fallgesetze sind nicht auf diese Weise gefunden worden. Galilei hat 1602 die Gesetze der schiefen Ebene zu Hülfe gewonnen, es ist daher an dieser Stelle die historische Deduction nachzuholen. Als hinlänglich bekannt setzen wir voraus die Sätze über das Parallelogramm der Kräfte, der Geschwindigkeiten und der Beschleunigungen, zumal dieselben nicht selten als physikalische Axiome angesehen werden. Wenn zwei Kräfte K_1 und K_2 in Richtungen wirksam sind, die unter einem Winkel φ zusammenstoßen, und man schneidet vom Schnittpunkte A dieser Richtungen die Strecken AB und AC als Maße dieser Kraft ab, so ist die Diagonale des entstehenden Parallelogrammes der Richtung und Größe nach die Mittelkraft, d. h. diejenige Kraft, deren Richtung und Größe der Punkt A statt der Kräfte K_1 und K_2 Folge leistet. Ein Gleiches gilt von den Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Umgekehrt läßt sich eine Kraft oder eine Geschwindigkeit oder eine Beschleunigung in zwei andere zerlegen, von denen die eine ihrer Richtung nach gegeben, die andere auf dieser senkrecht steht. Man erhält stets ein rechtwinkliges Dreieck, dessen Hypotenuse die Kraft K darstellt, und dessen Seiten $K \cos \varphi$ und $K \sin \varphi$ sind. Letztere vermögen die Kraft K zu ersetzen. $K \cos \varphi$ und $K \sin \varphi$ nennt man die Seitenkräfte, und die eine derselben ist durch die zu wählende Richtung als aufgehoben, als unwirksam zu betrachten.

Ich zeichne ein rechtwinkliges Dreieck ABC hin, in dem C der rechte Winkel und AC eine horizontale Lage hat. Auf AB biegt ein Kreis mit dem Mittelpunkte M und durch M sind ge-

zogen FM parallel AB, ME parallel BC und MN senkrecht auf MF. Diese Figur gibt den verticalen Durchschnitt für eine schiefe Ebene und ihre Belastung an. In M denkt man sich die Schwere der belastenden Masse vereinigt und wirksam in der Richtung ME, das zugleich die Größe des durch die Last gegebenen Druckes angibt. Statt ME kann man die Seitenkräfte MF und MN nehmen, die wenn $ME = K$ und der Winkel $MEF = BAC = \varphi$ gesetzt wird, die Werthe:

$$MF = K \sin \varphi \text{ und } MN = K \cos \varphi \cdots \quad 13.$$

erhalten und so beschaffen sind, daß $K \cos \varphi$ durch die schiefe Ebene AB aufgehoben wird, während $K \sin \varphi$ die Kraft ist, die zurückgehalten werden muß, wenn der Körper die Ebene nicht heruntergleiten soll, und die überwältigt werden muß durch einen kleinen Ueberschuß, wenn der Körper statt der senkrechten Bewegung von C nach B durch die schiefe Lage von A nach B zur selben Höhe gehoben werden soll. Ist $BC = 5$, $AB = 15$ so ist $\sin \varphi = \frac{1}{3}$ und ein 200 Kilogramm schweres Faß wird also mit einer Kraft die etwas größer ist als $\frac{200}{3} = 66\,{}^2/_3$ Kilogramm zur verlangten Höhe hinaufgeführt. Eine genauere Ueberlegung ergibt für die zu überwältigende Kraft $K \sin \varphi$ einen kleinen Zusatz. Die Kraft $K \cos \varphi$ wird allerdings durch die schiefe Ebene selbst gehalten, es entsteht aber dadurch für die wirkliche Bewegung eine Reibung auf der Ebene, die man gewöhnlich $= f\, K \cos \varphi$ setzt. Hier ist f der Reibungscoefficient und man bestimmt ihn dadurch daß die bewegende Kraft auf der schiefen Ebene $K \sin \varphi$ gleich der Reibung $f.\, K \cos \varphi$ gesetzt wird, woraus folgt $f = tng\, \varphi$. Für Eisenbahnen ist $f = \frac{1}{200}$ und für Chausseen $= \frac{1}{15}$ bis $\frac{1}{30}$ in allgemeiner Geltung. Die abwärts treibende Kraft $K \sin \varphi$ heißt auch die relative Schwere und die ihr entsprechende Beschleunigung γ ist leicht zu finden. Es ist nach §. 5 $K = m\gamma$ und $m = \frac{G}{g}$ folglich $\gamma = \frac{K \cdot g}{G}$. Hier ist nun statt K zu setzen unser $K \sin \varphi$ und K selbst ist gleich G; somit ergibt sich

$\gamma = g \sin \varphi$. Die Bewegungsgesetze auf der schiefen Ebene sind demnach $v = g\,t \sin \varphi$ und $s = \frac{1}{2}\,g\,t^2 \sin \varphi$ oder mit Berücksichtigung der Reibung:

$v = g\,t\,(\sin \varphi - f \cos \varphi)$ und $s = g\,t^2\,(\sin \varphi - f \cos \varphi) \cdots 14.$

Wenn ein Eisenbahnzug von 4000 Kilogramm auf einer geneigten Ebene von 1000 Meter Länge vom Zustande der Ruhe aus herabgleitet, dann ist $s = 1000$ und wenn die Steigung 4% beträgt $\sin \varphi = 0{,}04$ also $\cos \varphi = 0{,}9994 \cdot\cdot$ die Reibung ist meist $\frac{1}{200} = 0{,}005$ mithin erhält man.

$$1000 = \tfrac{1}{2} \cdot 10 \cdot (0{,}04 - 0{,}9994 \cdot 0{,}005)\,t^2 \text{ d. h.}$$
$$t = 75 \text{ Secunden ungefähr.}$$

Die Geschwindigkeit mit der der Zug ankommt ist $v = 10 \cdot 0{,}035004 \cdot 75 = 26$ Meter. $[0{,}04 - 0{,}9994 \cdot 0{,}005 = 0{,}035 \cdot\cdot]$

Die lebendige Kraft des Zuges endlich: $\frac{4000 \cdot 26^2}{2 \cdot g} = 135200$ K-M, weil $m = \frac{4000}{10}\left[\frac{K}{g}\right]$ ist.

Es ist also $v^2 = 2gs \sin \varphi$, aber $\sin \varphi = \frac{h}{s}$ Höhe und Länge der schiefen Ebene, mithin folgt $v^2 = 2\,g\,h$ oder $v = \sqrt{2\,g\,h}$ d. h. die auf der schiefen Ebene erlangte Geschwindigkeit ist gleich der durch den freien Fall erlangten, wenn die Höhe des Falles gleich der Höhe der schiefen Ebene ist. Die Zeit für die schiefe Ebene sei t, und die für den freien Fall $= t_1$, dann ist $v = g\,t_1$ und auch $= g\,t \sin \varphi$ mithin folgt $\frac{t}{t_1} = \frac{1}{\sin \varphi} = \frac{s}{h}$ in welcher Formel der Zusammenhang des Falles auf der schiefen Ebene mit dem freien Falle unzweideutig ausgesprochen ist.

Hat man wieder die schiefe Ebene in der Lage wie vorher, und in AB den Punkt M und zwischen M und B den Punkt G, durch den eine Parallele GD zu AC gezogen ist, während MD parallel BC das rechtwinklige Dreieck MGD vollendet, dann ist, wenn M den Schwerpunkt der Last und sie selbst vorstellt, MG die Richtung, welche sie verfolgt, wo hingegen MD die Fallhöhe bezeichnen darf. Nennt man die in MG wirksame Kraft K_1 wäh-

rend die in MD wirksame K heißt, so muß sein $K \cdot MD = K_1 MG$ oder $K_1 = K \frac{MD}{MG} = K \sin \varphi$, wie vorhin. Wirkt aber die Kraft K_1 in der Richtung von DG so ist $K_1 \cdot DG = K \cdot MD$ oder $K_1 = K \cdot \frac{MD}{DG} = K \, tng \, \varphi \cdot \cdot \cdot \cdot$ 15.

9. Dieser Fall kommt bei der Schraube vor, wie weiter unten sich zeigen wird; hier handelt es sich zunächst um das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten, durch welche die Resultate gewonnen sind. Wenn einem Systeme von materiellen Punkten oder Körpern, welches sich in Ruhe befindet, lebendige Kräfte zugeführt werden, so haben diese zunächst die verschiedenen Widerstände zu beseitigen, die sich der Bewegung der trägen Körpermassen entgegensetzen. Solche Widerstände sind die Massen selbst, die Reibung, die Verbindung der Körper durch Seile, die Zapfenlager der Rollen und dergl. Sind die zugeführten Kräfte so groß, daß diese Widerstände, welche man nun selbst als Kräfte bezeichnet, während die zugeführten lebendigen Kräfte den Namen Last erhalten, aufgehoben worden, so findet Gleichgewicht statt, das sich noch immer als Ruhelage kennzeichnet, aber als solche, die jedem keinem Kraftimpulse durch Bewegung nachgibt, und mit dem Aufhören des Impulses wieder eintritt. — Indifferentes Gleichgewicht. — Wenn man daher einem im Gleichgewichte befindlichen Systeme von Körpern, Belastungen und Kräften eine kleine Bewegung ertheilt, so findet beim Aufhören wieder Gleichgewicht statt dadurch, daß die geleistete Arbeit dem Satze von gleichen Wirkungen und Gegenwirkungen zufolge sich selbst aufhebt d. h. die Summe der virtuellen Geschwindigkeiten muß gleich 0 sein. Die virtuelle Geschwindigkeik wird erfaßt als das Produkt der Kraft in den möglicher Weise durchlaufenen Weg. Die Belastungen und Kräfte unterscheidet man durch die algebraischen Zeichen „+ und —“.

Wie bei der schiefen Ebene so findet das neue Princip auch bei dem Hebel eine durchaus kunstlose Anwendung. Jede starre Stange, in der an zwei Punkten senkrechte oder auch nur parallel gerichtete Kräfte wirken, ist ein Hebel. Wenn die Richtungs-

linien der Kräfte nicht parallel sind, so kann man dieselben einfach bis zum Schnittpunkte verlängern, da die Verlegung des Angriffspunktes einer Kraft innerhalb der Richtungslinie derselben als selbstverständlich erscheint, man hat dann das Parallelogramm der Kräfte zur Anwendung zu bringen. Man kann auch an dem Angriffspunkte der ersten Kraft zwei neue, der zweiten Kraft gleiche aber entgegengesetzte Kräfte hinzufügen, die der Richtung der zweiten Kraft parallel sind, dann erhält man zwei Kräfte, die einen Punkt angreifen und ein Kräftepaar dessen Wirkung indifferent ist. Hat man nun eine starre Leine AB, die um einen zwischen oder außerhalb A und B festliegenden Punkt P drehbar ist, und wird A von der Kraft K_1, B von der K_2 in parallelen Richtungen angegriffen, so muß, wenn Gleichgewicht stattgefunden hat, dasselbe auch nach einer kleinen Bewegung wieder eintreten, die um den Punkt P stattfindet und bei welcher A und B kleine Kreisbogen beschreiben, die als grade Linien betrachtet werden dürfen. Projicirt man diese auf die ursprünglichen Richtungslinien K_1 und K_2 und sind die Projectionen p_1 und p_2, so muß sein $K_1 \cdot p_1 = K_2 \cdot p_2$ oder $\frac{K_1}{K_2} = \frac{p_2}{p_1}$ und da $\frac{p_2}{p_1} = \frac{BP}{AP}$, so erhält man:

$$K_1 \cdot AP = K_2 \cdot BP \cdots \qquad 16.$$

Sind die Kräfte nicht senkrecht auf AB gerichtet, so fälle man auf die gegebenen Richtungslinien die Perpendikel Pq_1 und Pq_2, dann ergibt sich auch $\frac{AP}{BP} = \frac{Pq_1}{Pq_2}$ so daß auch jetzt wiederum $K_1 \cdot Pq_1 = K_2 \cdot Pq_2$.

Man nennt Pq_1 und Pq_2 die Hebelarme und $K_1\, Pq_1$ ein statisches Moment. Gewöhnlich fallen die Linien $q_1\, q_2$ und AB zusammen, es kann aber AB auch eine krumme Linie sein oder aus zwei graden bestehen, die in P einen Winkel bilden. — Gradliniger, krummliniger Winkelhebel. Liegt P zwischen A und B, dann ist der Hebel zweiarmig, beim einarmigen Hebel ist P außerhalb AB enthalten. Das System wird in nichts geändert, wenn der Drehpunkt P — Unterstützungspunkt oder Hypomochlion — sich immer in grader oder krummer Linie bewegt, sofern dieselbe nach einem vorgeschriebenen Gesetze erfolgt.

10. Die wichtigsten Umformungen des Hebels und der schiefen Ebene sind die Rolle, welche als feste oder bewegliche dem Systeme des Hebels angehört, und die Schraube und der Keil, welche Abänderungen der schiefen Ebene enthalten.

In der festen Rolle besitzt man das einfachste Mittel, die Richtung einer Kraft abzuändern. Soll das Hinaufziehen in ein Herabziehen verwandelt werden, was immer eine indirecte Kraftersparniß abgibt, indem der Arbeiter nicht so schnell ermüdet als beim Hinaufziehen, und sodann auch nicht seinen eigenen Körper zu heben hat, sondern ihn als Gewicht der herabziehenden Kraft zulegen kann, dann haben wir einen gleicharmigen gradlinigen Hebel, dessen Unterstützungspunkt der Mittelpunkt der Rolle ist: wird dagegen das Hinaufziehen in ein Ziehen längs der Horizontalen verwandelt, so hat man den gleicharmigen Winkelhebel. Aehnliches in vielen andern Fällen; die feste Rolle gestattet, wenn man Reibung und Steifheit der Seile außer Acht läßt, keine weitere mechanische Aufgabe. Anders die bewegliche Rolle. An dieser liegt immer der Drehpunkt am Umfange, die Kraft K_2 hängt am Mittelpunkte, und die Kraft K_1 am Umfange in der Entfernung $2r$ vom Drehpunkte, wenn r der Radius der Rolle ist. Es ist demnach $K_2 \cdot r = K_1 \cdot 2r$ oder $K_1 = \frac{1}{2} K_2$, wobei zu bemerken ist, daß der Drehpunkt sich in einer graden Linie bewegen muß. Die wichtigste Anwendung findet die bewegliche Rolle in den drei Flaschenzügen, dem Potenzflaschenzuge, dem gewöhnlichen Flaschenzuge und dem Differenzialflaschenzuge, die hier der mechanischen Aufgabe halber betrachtet werden müssen. Im Potenzflaschenzuge geht ein festgespanntes Seil um eine bewegliche Rolle, an deren Mittelpunkte durch eine Schere oder Hülse befestigt die Kraft K_2 hängt; das Seil greift an den Mittelpunkt einer zweiten beweglichen Rolle, die ebenfalls von einem zweiten festgespannten Seile getragen wird, dieses zweite Seil greift den Mittelpunkt einer dritten beweglichen Rolle an, die von einem dritten Seile getragen wird u. s. w. Das letzte festgespannte Seil geht um die letzte bewegliche Rolle und darauf über eine feste Rolle und trägt zum

Schluß die Kraft K_1. Es wiederholt sich also das obige Gesetz mehrmals in derselben Weise und es ist $K_1 = \frac{1}{2^n} K_2$, wenn n die Anzahl der beweglichen Rollen.

Im gewöhnlichen Flaschenzuge kommt auf je eine bewegliche Rolle eine feste, und seine Gleichung geht deshalb über in $K_1 = \frac{1}{2n} K_2$. Eine der beliebtesten Anordnungen besteht darin, daß zwei Hülsen mit je drei Rollen gewählt werden, die eine Hülse wird fest aufgehangen und ein Seil mit der Kraft K_1 wird über die obere Rolle und dann über die unterste der beweglichen Hülse, weiter über die zweite feste Rolle, dann über die zweite bewegliche, dann über die dritte feste Rolle und weiter um die dritte bewegliche Rolle geführt, um endlich an der festen Hülse befestigt zu werden, während die Kraft K_1 an der beweglichen Hülse aufgehängt ist. Bei einer kleinen Bewegung des Systems geht K_1 dreimal so tief herab als K_2 sich hebt, und demnach ist $K_1 = \frac{1}{6} K_2$.

Beim Differenzialflaschenzuge sind zwei feste Rollen von verschiedenem Radius, R und r, und eine bewegliche Rolle angebracht, und das System durch eine in sich zurücklaufende Kette (Kette ohne Ende) so verbunden, daß diese von einem Punkte der Rolle mit dem größern Radius R ausgehend um die bewegliche Rolle geschlungen wird, dann über die zweite feste Rolle verläuft, fernerhin lose herabhängt und über die feste Rolle R zum Anfangspunkt zurückkehrt. Zieht man nun an der losen Kette der festen Rolle R einen Punkt um einen Weg w herab, so muß die bewegliche Rolle mit der Kraft K_2 um $\frac{w}{2}$ gehoben werden; indeß wird diese Hebung erniedrigt durch die zweite feste Rolle r, die das $\frac{w}{2}$ um das $\frac{r}{R}$fache verkürzt, so daß das Resultat $= \frac{w}{2} - \frac{wr}{2R} = \frac{(R-r)\,w}{2R}$. Ein Zug am losen Ende der andern Seite, also der Rolle r, gibt eine Hebung der beweg-

lichen Rolle um $\frac{w}{2}$, die sich verändert um $\frac{w \cdot R}{2r}$ durch die Rolle R, es entsteht also als wirkliche Hebung $\frac{r-R}{2r} w = -\frac{R-r}{2r} w$, wobei die negative Hebung als Senkung erfaßt werden kann. Ist die ziehende Kraft K_1, so muß sein $K_1 \cdot w = \frac{R-r}{2R} w \cdot K_2$ im ersten und $K_1 w = \frac{R-r}{2r} w K_2$ im zweiten Falle, oder soll K_2 sich heben, so muß am Seile der Rolle R gezogen werden mit $K_1 = \frac{R-r}{2R} K_2$, soll aber K_2 sich senken, so muß man an der Rolle r ziehen mit einer Kraft $K_1 = \frac{R-r}{2r} K_2$.

Bei einer Welle und einem damit in fester Verbindung stehenden Rade sind die Radien des Rades r und der Welle ϱ die Hebelarme für die respectiven Kräfte K_1 und K_2, und es ist natürlich $K_1 r = K_2 \cdot \varrho$. Rad und Welle finden vorzugsweise Anwendung in den Räderwerken, in denen die Räder gezahnt sind und die Wellen aus parallelen Eisenstäben bestehen, die in Form eines Cylindermantels zusammengestellt sind. Am Rade r wirkt die Kraft K_1 und bewegt die Welle ϱ, diese greift in das gezahnte Rad r_1, dessen Getriebe ϱ_1 in ein drittes gezahntes Rad r_2 greift, mit dem endlich die Welle verbunden ist, an der die Kraft K_2 wirksam sein soll, es ist dann

$$K_1 \cdot r \cdot r_1 \cdot r_2 = K_2 \cdot \varrho \cdot \varrho_1 \cdot \varrho_2$$

11. Eine Schraube besteht aus der Schraubenspindel und der Schraubenmutter. Erstere ist ein fester Cylinder, der Schraubenkern, und eine schiefe Ebene, die denselben umwunden ist — Schraubengewinde —, letztere ist ein hohler Cylinder, in den ein Schraubengewinde eingeschnitten ist. Die Spindel paßt in die Schraubenmutter hinein, und ihre Windungen gleiten auf denen der letztern herab durch Anwendnng einer Kraft K_1, die am Umfange der Spindel und parallel ihrer Grundfläche wirkt. Das Wesen der Schraube besteht darin, daß die schiefe Ebene sich mehrmals wiederholt: eine schiefe Ebene bildet auf dem

Schraubenkerne eine Windung, so daß Anfangs- und Endpunkt in einer graden Linie des Kernes liegen und um die Höhe h von einander abstehen, an den höchsten Punkt legt sich die zweite, an diese die dritte Windung u. s. w. an. Die Kraft K_1 wirkt am Umfange der Spindel, deren Radius r ist und meist noch an einem Hebelarme p, so daß ihre Größe durch $K_1 \cdot \frac{p}{r}$ ausgedrückt werden muß. ($K_1\, p = x\, r$ wie schon oben), parallel der Spindelgrundfläche, wie schon gesagt, und deßhalb ist $K_1 \frac{p}{r} = K_2\, tng\, \varphi$, wenn K_2 die Kraft ist, mit der die Spindel in ihrer Richtung sich fortschiebt, und φ der Winkel, unter dem das Gewinde ansetzt. Es ist aber $tng\, \varphi = \frac{h}{2\, \pi\, r}$, und daher das Ergebniß:

$$K_2 = \frac{2\, \pi\, K_1 \cdot p}{h}$$

K_2 ist die Kraft, mit der die Spindel eine Last vorwärts schiebt oder wenn sie rückläufig gedreht wird, an sich zieht.

Der Keil ist nur eine zweifache schiefe Ebene. Ein grades dreiseitiges Prisma, dessen Grundfläche nebst ihrem parallelen Durchschnitte gleichschenklige Dreiecke sind, ist die Form des Keiles. Der ungleiche Winkel des Dreiecks, φ, bildet die Schneide, ein Perpendikel aus seinem Scheitel auf die gegenüberliegende ungleiche Seite die Höhe desselben, wie diese den Rücken. Die gleiche Seite ist die Länge der schiefen Ebene, der halbe Rücken ihre Höhe und die Höhe des Keiles die Breite derselben. Wird nun der Keil in eine Spalte eingesetzt, und wirkt der Widerstand normal auf die Seite desselben, so ist die Größe desselben K mit sin φ zu multipliciren für die einseitige Wirkung; wirkt aber der Widerstand K parallel dem Rücken des Keiles, so ist der sinus mit der tangente zu vertauschen. Die zu überwindende Gesammtkraft ist demnach $2\, K\, sin\, \varphi$ oder $2\, K\, tng\, \varphi$.

Es ist nicht überflüssig, eine wirkliche Ausführung der Rechnungen für die Bewegung, z. B. der Radwelle zu geben. Zu dem Ende seien ϱ, r und R die Radien des Zapfens der Welle

und des Rades, die Kräfte am Rade und an der Welle K_1 und K_2, die Gewichte derselben G_1 und G_2, dann sind die in Betracht kommenden statischen Momente $K_1 \cdot R$, $K_2 \cdot r$, $\varrho\,(K_1 + K_2 + G_1 + G_2)$, von denen die letztere noch mit f, dem Reibungscoefficienten zu multipliciren ist. Werden die Kräfte auf den Umfang eines Punktes am Rade reducirt, so sind sie wie in § 10: K_1, $\frac{K_2 r}{R}$ und $\frac{f\varrho}{R}(K_1 + K_2 + G_1 + G_2)$. Soll Bewegung stattfinden, so muß $K_1 - \frac{K_2 r + f\varrho\,(K_1 + K_2 + G_1 + G_2)}{R}$ nicht gleich 0 sein. Es sind nun die Massen $\frac{K_1}{g}$, $\frac{K_2}{g}$, $\frac{G_1}{g}$, $\frac{G_2}{g}$ und nachdem sie nach Formel 9 auf denselben Punkt des Radumfanges reducirt worden wie die Kräfte, wobei aus $\frac{K_2}{g}$ entsteht $\frac{K_2 r^2}{g R^2}$, aus $\frac{G_1}{g}$ aber das reducirte Trägheitsmoment $\frac{G_1 u_1{}^2}{g R^2}$ und aus $\frac{G_2}{g}$ ebenso $\frac{G_2 u_2{}^2}{g R^2}$, erhält man die Beschleunigung der Kraft K_1 nach der Formel $\gamma = \frac{K}{m}$.

$$\gamma = \frac{K_1 - \dfrac{K_2 r + f\varrho\,(K_1 + K_2 + G_1 + G_2)}{R}}{R_1 + \dfrac{K_2 r^2 + G_1 u_1{}^2 + G_2 u_2{}^2}{g R^2}} \quad \text{oder}$$

$$\gamma = \frac{K_1 R - (K_2 r + f\varrho\,[K_1 + K_2 + G_1 + G_2])}{K_2 R^2 + K_2 r^2 + G_1 u_1{}^2 + G_2 u_2{}^2} \cdot g R$$

Für die Beschleunigung der Kraft K_2 erhält man der Formel nach die Gleichung $\gamma_1 = \frac{\gamma r}{R}$. Sind $K_1 = 80$, $K_2 = 200$ Kilogrm., $R = 2{,}4$ Meter, $r = 0{,}5$ Meter, $\varrho = 0{,}1$ Meter $f = 0{,}1$, $G_1 = 60$ Kilogramm, $G_2 = 30$ Kilogramm, und ist das Rad so gebaut, daß man Radspeichen und Naben unberücksichtigt lassen kann, daß also wenn der äußere und innere Radius 2,4 und 2,1 Meter sind,

mithin das Trägheitsmoment $G_1 u^2 = 60 \cdot \frac{2,4^2 + 2,1^2}{2}$, während $G_2 u_2{}^2 = 30 \cdot \frac{0,5^2}{2}$, so entsteht

$$\gamma = \frac{80 \cdot 2,4 - (200 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 0,1\,[80 + 200 + 60 + 30])}{80 \cdot 2,4^2 + 200 \cdot 0,5^2 + 305,1 + 3,75} \cdot 2,4 \cdot 9,808$$

wenn $60 \cdot \frac{2,4^2 + 2,1^2}{2} = 305,1$ und $30 \cdot \frac{0,5^2}{2} = 3,75$.

oder $\gamma = 2,53 \cdots$ Meter.

12. Das mathematische Pendel ist ein Beispiel der periodischen Bewegung, und seine Theorie gipfelt in der Formel $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, in welcher t die Dauer einer Schwingung, l die Länge des Fadens und $g = 9,808$ ist. Die Formel wird durch einfache geometrische Constructionen, in denen die Lehre von der schiefen Ebene und dem freien Falle Anwendung finden gewonnen — ihre Herleitung steht selbst in elementaren Werken und muß hier übergangen werden —; sie ist natürlich nur annährend richtig aber in den meisten Fällen völlig ausreichend. Aus ihr folgen zunächst die zwei Gesetze: 1. die Pendelschwingungen sind isochron und 2. die Schwingungszeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen. Was das erste Gesetz anbelangt, so ist aus der Bewegung selbst erklärlich, daß die vom schweren Punkte durchlaufenen Bogen immer kleiner werden, bis die Bewegung ganz aufhört; trotzdem sind die Zeiten, in welchen diese verschiedenen Bogen durchlaufen werden einander gleich, offenbar weil der größern Erhebung, dem größern Erhebungswinkel eine größere Geschwindigkeit entspricht. Da indeß die Formel $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ nur annährend richtig und nur durch diese Annährung die Abhängigkeit von dem Elongations-Winkel φ, den Winkel um welchem das Pendel aus seiner lothrechten Lage gehoben wird, verloren hat, so gilt das Gesetz auch nur für sehr kleine Winkel, die 2 — 3 Grade nicht übersteigen. Zum zweiten Gesetze ist anzumerken, daß nach ihm also das kleinere Pendel kürzere Zeiten zu einer Schwingung verbraucht als das längere, daß es also in einer

bestimmten Zeit mehr Schwingungen vollbringt als das andere. Schwingt ein Pendel in einer bestimmten Zeit n mal, wobei jede Schwingung die Zeit t erfordert, während ein andres n_1 mal schwingt mit der Schwingungsdauer t_1 dann ist offenbar $\frac{t}{t_1} = \frac{n_1}{n}$, weil den längern Schwingungszeiten die kürzern Schwingungszahlen entsprechen. Demnach ist auch $\frac{\sqrt{l}}{\sqrt{l_1}} = \frac{n_1}{n}$ oder $\frac{n^2}{n_1{}^2} = \frac{l_1}{l}$ d. h. während ein 9 Meter langes Pendel 2 Schwingungen vollendet, hat ein 4 Meter langes schon 3 Schwingungen gemacht. Wichtig ist vor allem das Secundenpendel, d. h. dasjenige welches in einer Secunde eine Schwingung macht. Hat man ein beliebiges Pendel von der Länge l und bestimmt man durch genaue Beobachtung, was bei hinreichender Länge möglich ist, die Anzahl der Schwingungen, während einer Minute etwa auf 20, so ist hier $t = 3$ Secunden und demnach $\frac{9}{1} = \frac{l}{x}$ d. h. $x = \frac{1}{9}\, l$, wenn x die Länge des Secundenpendels angibt.

Der Uebergang vom mathematischen Pendel zum physischen, in welchem der Aufhängefaden eine schwere Metallstange und der schwingende Körper eine meist linsenförmige Gestalt hat, ist durch den Gedanken vermittelt, daß ein solches physikalisches Pendel aus sehr vielen einfachen Pendeln von verschiedener Länge bestehen müsse, wobei denn die kürzern Pendel in ihrer Bewegung durch die längern verzögert werden, so daß alle zusammen schwingen, wie ein einfaches, dessen Länge einem bestimmten Theile der Aufhängestange gleichkommt. Man kann die Länge des einfachen Pendels offenbar durch Probiren herausbringen, indeß gibt die Rechnung das Resultat leicht und sicher an. Eine Pendelstange CK sei um den Winkel $KCD = \varphi$ von der lothrechten Richtung CD entfernt, ihr Gewicht im Schwerpunkt S vereinigt gedacht, und $SC = a$, dann ist wenn m die Masse der Pendelstange $m \cdot g$ ihr Gewicht $\left(m = \frac{G}{g}\right)$ und dieses lothrecht wirksam am Punkte S, kann aber in zwei andere zerlegt werden, von denen eines nach der Richtung der Stange selbst wirksam

nicht zum Effect kommt, das andere dagegen $m.g.\sin\varphi$ in der darauf senkrechten Richtung zu berücksichtigen ist. Das statische Moment ist $m\,g\,a\sin\varphi$, weil es in der Entfernung a von C angreift. Ist nun unterhalb S ein Punkt B in der Pendelstange gedacht, der in der Entfernung l dieselbe Beschleunigung in der Drehbewegung erreichen soll, so ist, wenn $\mathfrak{M}$ das Trägheitsmoment der Stange ist, $\frac{\mathfrak{M}}{l^2}$ die auf den Punkt B reducirte Masse wie $\frac{m\,g\,a\sin\varphi}{l}$ die auf denselben reducirte Kraft und demnach

$$\gamma = \frac{m\,g\,a\sin\varphi}{l} : \frac{\mathfrak{M}}{l^2} = \frac{m\,g\,a\sin\varphi\cdot l}{\mathfrak{M}}.$$

Das einfache Pendel CB gleitet auf einer schiefen Ebene herab mit der Geschwindigkeit $\gamma = g\sin\varphi$ und demnach ist $g\sin\varphi = \frac{m\,g\,a\sin\varphi\cdot l}{\mathfrak{M}}$, woraus folgt

$$l = \frac{\mathfrak{M}}{m\cdot a}.$$

Da die Länge der Stange in unserm Falle $= 2a$, so ist nach der Bemerkung am Schlusse des §. 7 $\mathfrak{M} = \frac{1}{3}m\cdot(2a)^2 = \frac{4ma^2}{3}$ mithin $l = \frac{4a}{3}$ d. h. der Punkt B ist um $\frac{1}{3}$ vom untern Ende der Stange entfernt. Beim einfachen mathematischen Pendel müssen Schwingungs- und Aufhängepunkt mit einander vertauscht werden können. Ein physisches Pendel, bei dem das geschehen kann, heißt ein Reversionspendel, und ein solches verfertigt man sich dadurch, daß man an einer Pendelstange oben und in $\frac{2}{3}$ der Länge von oben gerechnet Schneiden anbringt, und zwischen beiden Punkten verschiebbare Gewichte, die nun durch Probiren an diejenigen Stellen gebracht werden, an denen die Umkehrung so gelingt, daß die Schwingungszeiten in beiden Fällen gleich sind.

Zweites Kapitel.

Werkzeuge und Maschinen.

13. Die Anwendungen des Hebels sind fast zahllos zu nennen; selten tritt die Idee desselben allein und rein hervor, wie in der Brechstange oder der Wage, häufiger treten Combinationen mit andern Maschinentheilen auf, wie schon das gewöhnliche Messer, die Scheren, Bohrer neben dem Hebel die Anwendung des Keiles aufweisen; eben so häufig sind Doppel- und mehrfache Hebel wie bei den Scheren, den Schiebkarren und Brückenwagen, endlich sind Umformungen in der Lage der bestimmenden Theile des Hebels der Grund, daß man sich in der Anwendung des einfachen Hebelgesetzes nicht sofort zurecht finden kann. Die statischen Momente sind übrigens den Quantitäten der Bewegung zu vergleichen; die Kräfte bei jenen sind hier die Massen oder die durch sie bewirkten Druckerscheinungen, und die Geschwindigkeiten sind als Hebelarme zu betrachten. Die oben angeführten Unterscheidungen zwischen gradlinigen, krummlinigen und Winkelhebeln, zwischen einarmigen nnd zweiarmigen, welche letztere wieder gleich- oder ungleicharmig sein können, zwischen Hebeln mit festen oder mit beweglichen Unterstützungspunkten sollen hier, wo es sich um die Anwendung handelt schärfer hervortreten.

Der zwei- und gleicharmige Hebel tritt am reinsten in der gewöhnlichen Wage hervor, die man nach ihrer verhältnißmäßig größern Richtigkeit und Empfindlichkeit als gemeine Krämer- oder Gold- oder Apothekerwage unterscheidet. Zu bemerken sind der Drehpunkt des Wagebalkens, der Schwerpunkt des Balkens und der Schalen, und die beiden Aufhängepunkte dieser. Die Krämerwage ist ein aus der Hand gearbeitetes Instrument ohne alle Vorrichtungen zur genauen Einstellung oder Beobachtung, die Goldwage unterscheidet sich von ihr durch die Leichtigkeit der verschiedenen Theile namentlich der Schalen und ihrer Aufhängetheile, die Apothekerwage endlich ist in neuester Zeit in so vorzüglicher Weise hergestellt, daß sie, wie Horn in Berlin und Sacré in Brüssel gezeigt haben bei Belastungen von 1 resp. 5 Kilo-

gramm und Uebergewichten von 0,1 oder 0,5 Milligramm noch einen Ausschlag gibt. Ein solches Resultat wird erreicht dadurch, daß 1. der Drehpunkt in einer scharfen Stahlschneide liegt, die auf einem Zapfenlager von Achat ruht, und daß das Gestell des Wagebalkens vermittelst eines Rädchens und einer in zwei Arme endigenden Stange aus dem Zapfenlager nach jedesmaligem Gebrauche herausgehoben wird — auch die Aufhängehacken sind scharfschneidig gearbeitet, — daß 2. durch Schrauben der Drehpunkt dem Schwerpunkte beliebig genähert und die Aufhängepunkte ebenfalls in der Verlängerung des horizontalen Wagebalkens nach Bedürfniß festgestellt werden können, daß endlich 3. durch kleine Metallstückchen, sogenannte Reiterchen, auf dem graduirten Balken in verschiedenen Punkten für Richtigstellung und Ausgleichung Vorsorge getroffen ist. Das letztere Mittel ist schließlich durch den sogenannten Präcisionsbogen von Gallois ersetzt, indem über dem Drehpunkte und von ihm aus gesehen ein convexer Bogen angebracht ist, dessen Mittelpunkt einen drehbaren Zeigerstab trägt, welcher nun durch Verschiebung den verlangten Ausgleich bewirkt. Fügt man noch hinzu, daß die Wage in stabilem Gleichgewicht sich befinden muß und daß dieses erreicht wird, wenn der Schwerpunkt unter dem Drehpunkte sich befindet, so ist ihre Theorie hinlänglich charakterisirt. Wenn nämlich Dreh- und Schwerpunkt zusammenfielen, so würde auch beim geringsten Uebergewichte der Wagebalken sich lothrecht stellen und sein Gebrauch mithin sehr verhindert sein; der allzutiefe Stand des Schwerpunktes unter dem Drehpunkte behindert natürlich die Empfindlichkeit der Wage und eine übergroße Belastung gibt der Reibung zu großen Spielraum. In die Klasse der gleicharmigen Wagen gehört auch noch die höchst bequeme Tafelwage, welche namentlich für den Gebrauch der Küche und des Ladentisches der gewöhnlichen Krämerwage vorzuziehen ist: auch sie gibt keine genauen Resultate. Solche gewinnt man durch zweimaliges Wiegen, indem man zuerst durch Gegenstände und Gewichtssteine von unbekannter Größe Gleichgewicht herstellt, und dann beim zweiten Wiegen die Gewichtssteine durch geaichte Gewichte ersetzt.

Als Schnellwage dient ein ungleicharmig-zweiarmiger Hebel,

an dessen kleinerem Arme die Last hängt, und an dessen längerem ein Laufgewicht sich in bestimmten Entfernungen, die Vielfache des kleineren Hebelarmes sind, verschieben läßt. Die Anwendung ist ohne nähere Auseinandersetzung klar; schwieriger sind die Brückenwagen zu erfassen, die für große Lasten eingerichtet sind, und je nach der Größe derselben den zehnten oder hunderten Theil der Last als Gegengewicht erfordern. Das Princip derselben besteht in der Verwendung von drei ungleicharmigen Hebeln, von denen die beiden untern durch feste Stangen so an dem obern befestigt sind, daß die auf dem mittlern ruhende Last als an dem obern unmittelbar aufgehängt erscheinen kann. Die Zeigerwage ist ein Winkelhebel an einer senkrechten Stellstange aufgehängt; der eine Arm mit der Wagschale ist horizonlal, der andere Arm hinter der Stellstange ist mit einem Gewichte beschwert und hängt lothrecht herab: ihm correspondirt ein Zeiger vor der Stange, der über einem eingetheilten Bogen spielt. Die Eintheilung dieses Bogens, die das Gewicht bestimmt, ist durch Versuche festgestellt, wie es in der Federwage geschehen, bei der das Gewicht indirekt durch die Spannung einer elastischen Feder erkannt wird.

Ungleicharmige Hebel sind sonst noch die Schlüssel und Bohrer. Bei erstern ist die Breite des Bartes der eine Hebelarm, während der andere durch den Griff gegeben ist; der zwischenliegende Schlüsselschaft hat also für die Wirkung keine Bedeutung. Die Bohrer haben ebenfalls in der Axe den Drehpunkt, die Schneide gibt den Arm der Last, der Griff den der Kraft an, doch können diese Instrumente noch anders betrachtet werden, da die schiefe Ebene hinzutritt und somit die Theorie der Schraube Beachtung finden muß. Zangen und Scheren sind zwei zweiarmige ungleicharmige Hebel. Bei der Schere liegt der Drehpunkt in dem Mittelpunkte der Scherenarme, und die zu durchschneidende Masse ist die zu überwältigende Last, während die Augen durch die Muskeln der Finger nach derselben Seite bewegt werden, nach welcher die Masse durch ihren Widerstand die Scherenarme zu drehen sucht. Ganz dieselbe Wirkung zeigt sich bei den verschiedenen Arten der Zange. Auch der Spaten und die Hebestange sind ungleicharmige Hebel. Nachdem der

Spaten vermöge seiner keilförmigen Gestalt leicht in die Erde hinabgestoßen, dient die Rückenkante als Drehpunkt, welche sich auf die obere Seite der Spalte stützt, der hölzerne Griff als Arm der Kraft und die Höhe des Spatens als Arm der Last, welche emporgeworfen wird. Geradeso die Hebestange, von der Archimedes spricht, wenn er sein berühmtes: „Gib mir einen Punkt und ich will die Erde bewegen“, ausruft. Wenn der Mond, der 50000 Meilen von der Erde entfernt ist, dieser Stützpunkt, und die Sonne in einer Entfernung von 20000000 Meilen der Angriffspunkt der Kraft, während die Erde im Gewichte von 14 Quadrillionen Pfund gehoben werden soll, so müßte sein

$$(20000000 - 50000)\, x = 50000 \cdot 14 \text{ Quadrillionen},$$

woraus x über 35000 Trillionen Pfund sich ergibt. Der emphatische Ausdruck erinnert jedoch daran, daß die Hebelstangen nicht über die Grenzen ihrer Starrheit hinaus belastet werden dürfen, und daß, was beim Hebel an Kraft gewonnen, zugleich an Zeit verloren wird, daß mithin die Momente aus den Kräften in die Wege in nichts geändert werden, sondern erhalten bleiben.

Andererseits lassen sich auch alle die genannten Werkzeuge, Scheren, Zangen, Hebestangen als einarmige Hebel gebrauchen. Wenn die beiden Schenkel einer Feuerzange ihren Nietpunkt so hoch an einem Ende haben, daß oberhalb desselben kein Handgriff möglich ist, so wirken Kraft und Last an derselben Seite des Drehpunktes und nach entgegengesetzten Richtungen. Ein Gleiches gilt von der Schafschere, deren beide Schenkel durch einen elastischen Bogen verbunden sind, ein Gleiches von der Hebestange, wie sie der Straßenpflasterer zum Aufreißen des alten Pflasters gebraucht, nur daß hier nur ein Hebel vorhanden, während bei der Schafschere und der Greifzange ein Doppelhebel ist. Ist die Erde zwischen Mond und Sonne, so kehrt sich das vorhin angegebene Beispiel des Archimedes in die Formel um:

$$(20000000 + 50000)\, x = 50000 \cdot 14 \text{ Quadrillionen},$$

deren Ergebniß unter 35 Trillionen Pfund herabsteigt. Das einfache Brodmesser ist ein einarmiger Hebel, dessen Drehpunkt an der Spitze des Messers liegt, dessen Last das zu durchschneidene Brod nach außen hin wirkt, während die das Heft des

Messers angreifende Kraft der Hände innenwärts zieht. Die Brodschnitte werden um so glatter, je mehr der Schneidende darauf achtet, daß die Messerspitze sich in grader Linie bewegt. Sind die Brode groß und hart, so wird die Spitze des Messers festgelegt, wie das auch bei den kleinen Schneideladen für Tabak und dergleichen geschieht. Bei größern Schneideladen, z. B. Häckselladen, ist der Drehpunkt in einem Kreisbogen enthalten, also wiederum beweglich, und die Hebung und Senkung desselben wird durch einen zweiten einarmigen Hebel, das Trittbrett bewirkt, das sich auch beim Spinnrade befindet, und hier dazu dient, die Stange auf- und abwärts gradlinig zu bewegen, welche nun aber an einem krummlinigen Hebel, der sogenannten Kurbel, excentrisch angreift und die grade fortschreitende in eine drehende Bewegung umsetzt — Spinnradbewegung. — Der Drehpunkt des gewöhnlichen Brod- oder Tafelmessers ist so eben nach Analogie der Tabaks-Schneidelademesser an die Spitze verlegt; es ist das nicht nöthig, als Drehpunkt desselben kann auch das Handgelenk angesehen werden, so daß nun die Muskelkraft am kürzern, die Last am längern Arme wirkt. Bei Gabeln, sowohl den kleinern, wie sie für den Tisch passen, als auch bei den größern, wie sie die Landwirthschaft unter verschiedenen Namen als Forken, Heugabeln u. s. f. kennt, ist der Drehpunkt stets das Handgelenk, die Last am größern Arme macht den weitern, die Muskelkraft am kürzern den kleinern Weg. Bei diesen und ähnlichen Werkzeugen geht nicht selten während des Gebrauches der einarmige Hebel in einen zweiarmigen Hebel über, indem die an einander liegenden Hände auseinander gleiten und die der Last am nächsten stehende als Drehpunkt des Hebels angesehen wird. Deutlich nimmt man diesen Umtausch wahr beim Holzhauer, auch bei Vorschlägern in Eisenschmiedereien. Während nämlich Aexte und Hämmer beim Niederschlagen einarmige Hebel sind, deren Drehpunkt im Handgelenke ist, und deren Last durch die Bewegung und den längern Hebelarm sich in einer erhöhten Wirkung kundgibt, wird zum Aufheben des Werkzeuges vom Arbeiter stets die gedachte Manipulation vorgenommen, gewissermaßen um Kraft für den neuen Schlag zu sparen.

Die wichtigsten einarmigen Hebel sind offenbar die Knochen des menschlichen und thierischen Körpers, für welche als Drehpunkt die Gelenke, und als Kraft der zusammengezogene Muskel anzusehen ist; die Belastung ist weiter vom Drehpunkte entfernt als die angreifende Muskelkraft, die nicht selten von sehr beträchtlicher Größe sein muß. So haben die Muskeln des gebogenen Kniees für einen Mann von 120 Pfund, dessen Schultern mit einem Gewichte von 200 Pfund belastet sind, beim Wechsel der Füße im Gehen ungefähr 6 · 320 Pfund das Gleichgewicht zu halten. Die gewöhnlichen Verrichtungen des Hebens, Werfens, Schreibens und dergleichen sind mehr oder minder versteckte Anwendungen des physischen Hebels und es gilt meist die Vorschrift, mit steifen Armen die vorgeschriebene Arbeit zu verrichten, um eine zweckentsprechende Wirkung zu erzielen, was nicht anders heißen soll, als daß der Drehpunkt fest sein oder in festen Linien sich bewegen muß.

Es geht schon hinlänglich aus dem Mitgetheilten hervor, daß die starre Stange, welche als Hebel dient, nicht gerade zu sein braucht. Winkelhebel und gekrümmte Hebel, wie sie bei Schellenzügen, Thürklinken und andern durch die Technik bedingten Umformungen nöthig werden, erfordern immer nur wie vorher die Bestimmung des Drehpunktes und der Angriffspunkte von Kraft und Last, dann sind die Hebelarme sofort die Senkrechten auf die Richtungslinien der Kräfte aus dem Drehpunkte.

14. Die feste Rolle wirkt allein angebracht fast nur zur Abänderung der Kraftrichtung und ist dann sehr häufig ein Winkelhebel, in Verbindung mit beweglichen Rollen zu Flaschenzügen ist sie gleicharmiger Hebel. Die gewöhnlichen Flaschenzüge werden vorzüglich in zwei Formen zur Anwendung gebracht, so daß entweder die Rollen neben einander oder unter einander liegen. Welle und Rad erhalten ebenfalls verschiedene Gestalt nach Art der Verwendung. Greift bei dieser Maschine die Kraft an kleinen Hebelstangen an, die in der Verlängerung der Radien des Rades liegen oder an Zapfen, die seitwärts am Radkranze angebracht sind, so hat man die Radhaspel; ist das Rad aber durch vier auf einander senkrechte Radien ohne Radkranz herab-

gemindert, so ist die Kreuzhaspel da — es können natürlich auch mehr als vier Speichen angebracht sein —, ist endlich nur eine Speiche statt des Rades vorhanden, die grade oder gebogen an ihrem freien Endpunkte einen hebelförmigen Griff trägt, so haben wir die Kurbel und nennen die ganze Vorrichtung einen Hornhaspel. Die Grubenwinde sowie die Erdwinde oder der Göpel sind Haspel, die eine Welle mit horizontaler oder mit lothrechter Lage haben. Hierher gehören auch die Tretscheiben der Töpfer, die Laufräder, die Windmühlenflügel, sowie die gezahnten Räder, welche Stirnräder heißen, wenn die Zahnung am Umfange des Rades, dagegen Kammräder, wenn sie seitwärts am Radkranze angebracht ist. Speciellere Anwendungen sind namentlich die Winden und der Krahn. Bei allen Winden greift ein durch eine Kurbel bewegtes Stirnrad in eine gezahnte Stange ein und bewegt dieselbe in ihrer eigenen Richtung. Die einfache Winde hat nur ein Rad mit einer Kurbel, während die zusammengesetzte ein Rad und zwei Getriebe mit einer Kurbel aufweist; die sogenannte englische Winde gehört zu den Anwendungen der Schraube. Winde und Flaschenzug im Verein geben den Krahn. Bei demselben ist das Getriebe des Rades eine Welle, deren Seil seitwärts zu einer festen Rolle führt, die nun ihrerseits den Flaschenzug trägt.

Das Getriebe eines Uhrwerks, wie es die gewöhnlichen Cylindertaschenuhren zeigen, besteht aus drei Theilen, dem eigentlichen Triebwerk, dem Zeigerwerk und dem Hemmungswerk. Ersteres ist ein vertical stehender Stift, der auf dem Zeigerblatte vermittels eines Schlüssels durch eine Drehung von links nach rechts eine am unteren Ende fest angebrachte Triebfeder aufrollt, die nun durch ihr nach den Elasticitätsgesetzen bedingtes Aufrollen die ganze Bewegung erzeugen soll. In der Mitte des Stiftes ist ein Stirnrad, welches beim Aufdrehen über einen federnden Haken hingleitet, der auf einem zweiten Stirnrade fest aufliegt, das seinerseits auf einer um den Stift beweglichen Hülse sich frei herumdreht. Nach dem Aufdrehen wirkt die Triebfeder im entgegengesetzten Sinne, das erste Stirnrad greift in den Sperrhaken hinein und dreht nun das freie zweite Stirnrad herum.

Seine Zähne greifen in das Getriebe des Zeigerwerkes, das aus einem großen Bodenrade besteht, dessen Welle oben den Minutenzeiger trägt und unterhalb durch ein doppeltes Radgetriebe von drei- und viermal so viel Zähnen den Stundenzeiger regulirt, der also eine zwölfmal langsamere Bewegung haben muß als der Minutenzeiger. Das Großbodenrad greift durch seine Zähne in das Kleinbodenrad ein, und überträgt dadurch die Bewegung auf das Hemmungswerk. Das Getriebe des Kleinbodenrades bewegt ein ferneres Rad, welches in das Getriebe des Hemmungsrades eingreift. Auf dem Umfange desselben liegen Keile von bestimmter Form, die beim Umgange in einen nebenstehenden Cylinder eingreifen, an dessen obern Ende ein größerer Radkranz, die Unruhe, sich hin und her bewegt, jenachdem eine um den Mittelpunkt liegende feine Spiralfeder aufgerollt wird, und durch ihre Elasticität sich wieder abrollt, wobei der Cylinder selbst durch die Keile des Hemmrades sich abwechselnd feststellt und weiter bewegt, wenn sich dieselben an seinen Vertiefungen vorbeigeschoben haben. Statt der Cylinderhemmung hat man als wirkungsvollere die Ankerhemmung eingeführt, bei welcher ein gezahntes Rad durch einen pendelartig schwingenden Haken Hemmung und Fortschritt der Bewegung von der Unruhe und ihrer Spiralfeder überträgt.

Die Schraube wird als eine flachgängige oder als eine scharfgängige verwendet, jenachdem der Durchschnitt der Schraubenwindung auf dem Kerne eine quadratische oder eine dreieckige Form hat. Schrauben der ersten Art dienen vorzugsweise zum Festhalten und Pressen, indem die Schraubenspindel durch zwei Brettlagen hindurchgeführt wird, zwischen denen der zu pressende Gegenstand liegt und nun die Schraubenmutter hinter der äußern Wand sich gegen den Schraubenkopf bewegt, bis sie an dem Widerstande ihre Ruhelage findet. Bohrer und Korkzieher sind scharfgängige Schrauben, und werden in der Richtung der Spindel bewegt, die Schraubenmutter fällt natürlich fort oder bildet sich vielmehr jedesmal in dem weichern Holze, das die Spindel durchbohren soll. Verbindet man ein Schraubengewinde mit einem Zahnrade in der Art, daß die erstere in die schiefgeschnittenen

Zähne des letztern eingreift, so wird das Rad sammt der an ihm befindlichen Welle bewegt, sobald das Gewinde durch eine Kurbel um seine Axe gedreht wird. Das Schraubengewinde heißt in diesem Falle Schraube ohne Ende. Sie findet eine specielle Anwendung in der englischen oder der Schraubenwinde. Die Schraubenspindel ist lothrecht gestellt, und ihr Kopf trägt die Last. Als Schraubenmutter dient ein horizontales Stirnrad, und dieses wird durch eine Schraube ohne Ende in Bewegung gesetzt, wobei die Schraubenspindel sich hebt. Wichtig ist in der Großindustrie die Schiffsschraube, welche 1827 von Ressel in Triest erfunden wurde und anstatt der Schaufelräder bei Dampfschiffen Anwendung fand; und ebenso wichtig als Meßapparat die Micrometerschraube. Wenn eine feine Schraubenspindel so flachgängig gebohrt ist, daß zur Weiterführung der Spindel in ihrer Richtung um 1^{mm} eine doppelte ganze Umdrehung des Schraubenknopfes erforderlich ist, so wird durch eine Umdrehung des letztern von nur 12° eine Fortbewegung der Spindelspitze um 0,016^{mm} bewirkt werden. Die Umdrehung um 12° kann sichtbar gemacht und ausgeführt werden, mithin auch eine gradlinige Fortbewegung eines Punktes um eine so geringe Größe, daß ein anderer Maßstab zu ihrer Messung nicht angegeben werden könnte.

Die unmittelbare Verwendung des Keiles bei Messern, Aexten, Meißeln, Sägen, Feilen, Raspeln, Hobeln, Nägeln u. s. f., sowie die vermittelte desselben bei verschiedenen Pressen, braucht hier nur angedeutet zu werden; wichtiger sind noch die gekröpfte Kurbel und die Spinnradvorrichtung, durch welche eine gradlinige Bewegung in eine drehende umgesetzt wird.

Das Wesen der Kurbel besteht in zwei graden Stäben, einem längern und einem kürzern, der sogenannten Handhabe, die beide durch einen senkrechten Mittelstab, die Höhe der Kurbel mit einander verbunden sind, so daß nun die Handhabe um den ersten Stab als Axe in der constanten Entfernung der Höhe drehend bewegt wird. Werden zwei solcher Kurbeln mit ihren Handhaben zu einem Ganzen vereinigt, so kann der Verbindungspunkt der Handhaben als Angriffspunkt einer größern Stange, der sogenannten Leitstange, dienen, die nun am Verbindungs-

10*

punkte die kreisförmige Bewegung der Kurbelhandhaben mitmacht, aber nach ihrer Richtung sich hin- und herschiebt, also die kreisförmige Drehung in eine fortschreitende Bewegung umsetzt. Die Spinnradvorrichtung ist wesentlich dieselbe, es ist nur eine Kurbel nöthig, an deren Handhabe eine Leitstange lose angreift, so daß ein gewisser Spielraum bleibt, der der doppelten Höhe der Kurbel entspricht; am andern Ende der Leitstange ist ein Trittbrett lose angebunden, welches durch den Fuß der Arbeiterin nach den Gesetzen des einarmigen Hebels auf- und abwärts bewegt wird. Dadurch senkt und hebt sich die Leitstange und die Kurbel wird in eine drehende Bewegung versetzt, deren Geschwindigkeit am höchsten und niedrigsten Punkte, den sogenannten todten Punkten, am geringsten ist, jedoch durch das Rad an der Axe der Kurbel nicht nur in der Richtung, sondern auch für diese beiden Zeitmomente in einer ausreichenden Gleichmäßigkeit erhalten wird. Die wissenschaftliche Benennung für den Mechanismus solcher Umsetzungen der Bewegung heißt die Excentric oder die excentrische Scheibe.

15. In der Zusammensetzung der Maschinen hat die neuere Technik ihre größten Triumphe gefeiert, eine Erfindung drängt in der Gegenwart die andere, überall tritt das Bedürfniß der Ersparniß an Menschen- und Thierkraft, sowie das Verlangen nach mechanischer Arbeit als der regelmäßigern und exactern hervor; mechanische Spinnereien, Maschinenbauanstalten, Schleifereien und dergleichen haben beim ersten Anblick etwas Verwirrendes, sind aber durch Zerlegung in die einzelnen Theile leicht zu erfassen, und lassen meist nur das Geständniß zu, daß einfache Gedanken scheinbar höchst verwirrte Probleme gelöst haben; daß aber andrerseits ein zusammengesetzter Apparat nicht auf einmal im Kopfe des Erfinders sich gestaltet, sondern daß seine Vervollkommnung durch den ursprünglichen Erfinder und seine Nachfolger allmälig und durch leise Uebergänge bewerkstelligt worden. Hierfür liefert die Dampfmaschine einen sehr lehrreichen Beleg, und sie soll denn an dieser Stelle nach Seite ihrer mechanischen Herstellung einer nähern Betrachtung unterworfen werden.

Die Etappen auf der langen Bahn der Erfindungen werden

durch die Namen Papin, Newcomen, Watt, Evans, Fulton, Stephenson bezeichnet: Papin in Cassel stellte Versuche über die Elasticität des Wasserdampfes an, Newcomen construirte 1705 die erste atmosphärische Dampfmaschine, die Watt durch eine lange Reihe von Jahren (1757—1774) zur Niederdruckmaschine emporführte, mit der das Problem im Großen und Ganzen gelöst war. Evans construirte die Hochdruckmaschine schon 1797, und Fulton erbaute 1807 das erste Dampfschiff, während Stephenson seit 1814 bis 1829 die Locomotive herstellte. Nachdem Papin die Idee, den Dampf als bewegende Kraft zu benützen, bekannt gemacht hatte, richtete sich die That Newcomens auf Verwendung derselben zu leichten Hebung von Wassermassen. Ein oben offener Cylinder hatte einen luftdicht schließenden Kolben mit einer Leitstange, die an einem auf einem Gestelle ruhenden Wagebalken lose befestigt war, während das andere Ende mit der Last beschwert war. Der Dampf unter dem Kolben trieb diesen, die Leitstange und den Arm des Balanciers in die Höhe und senkte die Last. Aus einem Hahnventile unter dem tiefsten Stande des Kolbens wurde nun der Dampf herausgelassen, nachdem er vorher durch Einspritzung von kaltem Wasser zu Wasser sich condensirt hatte. So entstand unter dem Kolben im Cylinder ein luftleerer Raum, weßhalb der Luftdruck von Außen den Kolben niederdrückte und mit ihm das Gestänge am andern Ende des Balanciers in die Höhe zog. Es war natürlich, daß man zur stetigen Verwendung den Dampf in einem besondern Dampfkessel erzeugte, und ihn durch ein Rohr unter den Kolben führte. Das Oeffnen der Hahnventile mußte zunächst durch Arbeiter hergestellt werden, wozu gewöhnlich junge Leute verwandt wurden. Einer derselben, Humphrey Potter, fand die Amtirung langweilig und verband die Hähne mit Schnüren an dem auf- und abgehenden Balancier, so den Anfang der Maschinentheile erfindend, welche man später die Steuerung nannte. Der Dampf konnte nicht unmittelbar in die freie Luft abgelassen werden, weil dann unter dem Kolben noch eine Expansion desselben oder der eindringenden freien Luft verblieben wäre, die dem Luftdrucke von Außen gleichwerthig gewesen und so das Gestänge an

der andern Seite der Maschine sich nicht gehoben hättte. Die bis dahin gültige Kaltwassereinspritzung hatte aber zumeist den Uebelstand, daß der Cylinder zu sehr abgekühlt wurde, und daß darum ein Theil des neu eingeführten Dampfes nicht zum Effekt kam. Zu dem Ende erfand Watt den Condensator, ein besonders abgegrenzter Cylinder, der aus einem großen Wasserreservoir durch Wasserpumpen kaltes Wasser zugeführt erhielt und dessen lufthaltiger oberer Raum durch Luftpumpen entleert wurde, so daß der Dampf aus dem Arbeitscylinder durch ein Verbindungsrohr von selbst nach dem Condensator hinfloß.

Auch die neuen Zuthaten wurden in die erweiterte Steuerung einbegriffen, und der Effekt der Maschine erwies sich als der Druck von 0,542 Atmosphären, weil 0,458 Atmosphären sich als Verlust ergaben. Dieser rührt von dem Umstande her, daß der Arbeitscylinder nicht ganz dampf- und luftleer wird und eine Temperatur von ungefähr 50° behält, was einer Spannung von 0,134 entspricht, daß ferner die Reibung des Kolbens mit 0,124 und die entgegenstehende Bewegung der Steuerung mit 0,100 überwunden werden muß. Die fernere Verbesserung bestand nun in der Schließung des obern Endes des Arbeitscylinders und der Zuführung des heißen Dampfes oberhalb und unterhalb des Kolbens, wodurch sich die Steuerung bis zu der Vollendung erhob, welche wir jetzt mit der Technik des Schiebkastenventils ausgeführt sehen. Die Idee des Apparates besteht darin, daß seitwärts am Cylinder ein viereckiger hohler Raum für den Dampf angebracht ist, aus dem zwei Gänge in die Wand des Cylinders bogenförmig nach oben und unten führen, während an einer Stange, die von einer excentrischen Scheibe am Balancier bewegt wird, eine Ventilklappe abwechselnd vor den untern Gang, dann vor beide, und dann vor den obern Gang tritt, so daß im ersten Falle beim niedrigsten Stande des Excentrics der Dampf aus der Dampfkammer oberhalb des Kolbens in den Cylinder dringt, während aus dem andern Gange der Dampf in eine zweite Kammer innerhalb der Cylinderwand eindringt, und von hier aus durch ein Leitrohr ins Freie geführt wird und der Kolben in der Cylindermitte sich befindet. Dann geht der Kolben in

die Höhe, das Excentric ebenfalls um eine Vierteldrehung und das Schieberventil tritt vor beide Gänge; bei einer weitern Vierteldrehung des Excentrics geht der Kolben herunter, das Schieberventil schließt den obern Gang und öffnet den untern mit denselben Erfolgen wie vorher. Läßt man den Dampf während der ganzen Bewegung des Kolbens in immer gleicher Stärke in den Cylinder treten, so muß der Kolben sich nothwendig beschleunigt bewegen und bei der größten Höhe und Tiefe die größte Geschwindigkeit haben, also eben da, wo die Bewegung sich umsetzen soll. Die Reibung des Kolbens wirkt zwar entgegen und beim Aufsteigen zugleich auch die Schwere, allein die Bewegung würde eine unregelmäßige und stoßweise werden, deßhalb hat man zunächst das Voreilen des Schiebers eingeführt, dadurch, daß das Excentric mit der Kurbel einen stumpfen Winkel bildet und sodann den Hohlraum des Schiebers etwas größer gemacht als die Entfernung der innern Ränder der Dampfwege in der Cylinderwand. So tritt also Dampf unter den Kolben, wenn er sich noch nicht abgewendet bewegt, und es ist sofort die volle Kraft bereit, während andererseits durch das verzögerte Ausströmen des Gegendampfes eine Mäßigung der Bewegung hervorgerufen wird. Diese letztern Einrichtungen verleihen der Dampfmaschine den Namen der mit Expansion arbeitenden oder der Expansionsmaschinen, weil man mit kleinern Dampfmassen ihrer Expansionsfähigkeit halber, die vor der Bewegung eintritt, größere Arbeit verrichten kann als mit größern, falls jene Vorrichtungen fehlen.

Arbeitet man nun mit derartigen Maschinen mit einem Druck von etwa zwei Atmosphären oder mit Dampf der bis 121° erhitzt ist, so muß der Kolben im Cylinder eine ziemliche Größe erhalten, wenn verhältnißmäßig größere Arbeitswirkungen nach außen hervortreten sollen, außerdem nehmen Condensator und Pumpen und Wasserkammern einen beträchtlichen Raum in Anspruch, der in vielen Fällen nicht gewährt werden kann. Deshalb war es wünschenswerth statt dieser Niederdruckmaschinen andere, sogenannte Hochdruckmaschinen zu construiren, welche durch größere Druckkraft des Dampfes Condensator und Pumpen überflüssig

machen konnten. Auch das Schwungrad entfiel bei den Hochdruckmaschinen, welches bei der Watt'schen zur Ueberwindung der sogenannten todten Punkte nothwendig gewesen. Dafür mußten einige andere Abänderungen und Vorsichtsmaßregeln getroffen werden. Vorzügliche Sorgfalt war auf den Kessel zu verwenden der aus festem geschlagenem Eisen- oder Kupferblech verfertigt wird. Die Form desselben ist theils cylinderisch, theils kofferförmig, aber immer muß die Länge die Höhe und Breite übertreffen. Der Feuerraum ist nicht nur unten, sondern auch von außen her umspülen ihn die Flammen in besondern Kanälen. Zuweilen ist der Kessel ein Doppelcylinder, dessen innerer dann den Feuerraum bildet. Man sucht in einer Minute auf einem Quadratmeter $\frac{1}{2}$ Kilogramm Dampf von 100^0 je entwickeln. Bei Locomotiven ist das System der Röhrenkessel angewendet; es gehen nämlich durch den Wasserraum viele heiße Röhren neben einander parallel der Axe des Kessels, deren Durchmesser nicht über 3^{cm} beträgt. Der Kessel wird mit heißem Wasser gespeist, hat Sicherheitsventile die sich bei zu hohen Spannungen öffnen und einen Regulator, welcher das Herausströmen des Dampfes in den Dampfraum des Schiebkastenventils vermittelt.

16. Die Anwendungen des Pendels als Chronometer und Metronom, Zeit- und Taktmesser sind für das erste an jeder Stubenuhr, für das zweite weiter unten in der Akustik zu studieren, hier muß zuerst daran erinnert werden, daß aus der bekannten Pendellänge eines Ortes das oft gebrauchte g hergeleitet werden kann. Aus dem Vergleiche eines beliebigen Pendels hinsichtlich seiner Länge und der Anzahl der vollbrachten Schwingungen für eine bestimmte Zeit läßt sich die Länge des Secundenpendels bestimmen und ist diese für Paris etwa $0{,}9933^m$ so ist $g = 9{,}808$. Wenn somit das g für verschiedene Punkte der Erde verschieden ist, namentlich auf hohen Bergen oder in tiefen Schachten und am Aequator anders als in höhern Breiten zu den Polen hin, so ist es doch für denselben Ort auf der Erde für alle Pendel aus den verschiedensten Stoffen constant, d. h. alle Körper sind gleich schwer. Die Vergleichung der Werthe von g in verschiedenen

Orten der Erde nach der Gleichung $\frac{g}{g_1} = \frac{n^2}{{n_1}^2}$ weil nach Formel 12 $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ und $t_1 = \pi \sqrt{\frac{l}{g_1}}$ also $\frac{t^2}{{t_1}^2} = \frac{g_1}{g}$ und $\frac{t^2}{{t_1}^2} = \frac{{n_1}^2}{n^2}$ hat zum Resultate gehabt, daß man die Abplattung der Erde messen konnte. Auch das Gewicht der Erde, mithin auch das der Sonne und der Planeten hat man durch das Pendel zu bestimmen vermocht. 1775 beobachteten Maskelyne und Hutton die Ablenkung des Pendels von der lothrechten Richtung durch den Berg Shehallian und durch eine genaue Abschätzung des Gewichtes desselben erhielten sie das Gewicht der Erde = 4,5 des Gewichtes einer gleich großen Wasserkugel. Cavendish nahm seine bekannte Drehwage und ließ dieselbe durch schwere Bleikugeln in Schwingungen gerathen, Carlini verglich die Länge des Secundenpendels in Bordeaux mit der auf dem Mont Cenis; Reich in Freiburg (1838) und Airy in Harton (1854) ließen Pendel in tiefen Schachten und auf der Erdoberfläche schwingen, und so wurden die Werthe 4,5 - 4,4 - 5,5 - 6,5 gefunden. Man sagt daher annähernd: das specifische Gewicht der Erde ist 5 (siehe unten).

Wie die Coulomb'sche Drehwage und die anziehenden Bleikugeln, ebenso verhalten sich feste Hufeisenmagnete und Magnetnadeln. Coulomb fand, daß eine Nadel unter Einwirkung des Erdmagnetismus 15 Schwingungen, unter Einwirkung eines 4 Zoll entfernten Magneten 41, aber 24 Schwingungen mache, wenn die Entfernung auf 8 Zoll vergrößert werde. Nennen wir die Kraft des Erdmagnetismus E, die des Magneten in 4 Zoll Entfernung M_1 und die desselben in 8zölliger Entfernung M_2 dann ist

$$\frac{M_1 + E}{E} = \frac{41^2}{15^2} \text{ oder } \frac{M_1}{E} = \frac{41^2 - 15^2}{15^2} \text{ und ebenso}$$

$$\frac{M_2}{E} = \frac{24^2 - 15^2}{15^2} \text{ also}$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{41^2 - 15^2}{24^2 - 15^2} = \frac{1456}{351} = \frac{4}{1} \cdot$$

d. h. die magnetischen Kräfte nehmen ab, wie das Quadrat der Entfernung.

Die letzte Anwendung des Pendels ist der Foucault'sche

Versuch 1851. Ein Pendel über dem Pole möglichst frei aufgehangen, wird seine Schwingungsebene beibehalten, aber weil die Erde von Ost nach West sich um die Axe dreht, so wird scheinbar diese Ebene innerhalb 24 Stunden eine vollständige Drehung um 360° vollziehen. Schwingt dagegen das Pendel über einem Punkte des Aequators, so findet keine Drehung der Schwingungsebene statt. Für Punkte zwischen dem Aequator und dem Pole findet daher nur eine theilweise Drehung der Schwingungsebene statt und zwar muß man nach den Ergebnissen der Rechnung den Sinus der Breite mit 360° multipliziren. In Berlin beträgt die tägliche Drehung $\sin 52^0\,30' \cdot 360 = 0{,}793 \cdots 360$. Wenn nun diese Rechnung Resultate ergibt, die mit den Beobachtungen übereinstimmen, so muß die Voraussetzung der Axendrehung der Erde, auf welcher sie beruht, eine richtige sein.

Drittes Kapitel.

Mechanik des Wassers und der Luft.

17. Flüssige und luftförmige Körper haben wegen der Beweglichkeit ihrer Moleküle für die übertragene Bewegung die meisten Gesetze und Erscheinungen mit einander gemein, so daß ein Zusammenfassen der hier zu besprechenden Thatsachen durchaus zweckentsprechend sein wird. Zunächst nehmen wir Notiz von der Fortpflanzung eines einseitig ausgeübten Druckes nach allen Seiten und Wänden des einschließenden Gefäßes. Das Gesetz ist in sich selbst gegründet, und wird nicht mehr räthselhaft erscheinen, wenn man in Erwägung zieht, daß ein fester Körper nur deshalb einen Druck nach einer Seite hin fortpflanzt, weil die Starrheit des Körpers die andern Druckwirkungen aufhebt. Experimentell kann das Gesetz leicht nachgewiesen werden, wenn man einem beliebig gestalteten Gefäße mehrere Löcher einbohrt, die man durch Zapfen verschließen kann. Wird das Gefäß nun mit Wasser gefüllt, indem alle Zapfen bis auf einen

geschlossen, und wird nun auch dieser geschlossen und angemessen belastet, so springen alle übrigen heraus, sobald der angewandte Druck die Kraft ihres Festhaltens überwiegt. Die erste Folge des allseitig sich fortpflanzenden gleichen Druckes ist das Gesetz, daß in communicirenden Gefäßen die Flüssigkeiten gleich hohen Stand der Verticale nach erreichen, wie verschieden auch die Weite der Gefäße respectiv der Schenkel sein mag. Hierauf beruht zunächst die Verwendung des hydraulischen Druckes nach oben. Hat man ein weites niedriges Gefäß von cylindrischer Form, dessen obere offene Seite mit einer frischen thierischen Blase verschlossen ist, und in das von der Seite her eine zweite lange und enge senkrecht gestellte Röhre mittels eines Kniees oder einer curvenförmigen Biegung mündet, so wird wenn der ganze Apparat mit Wasser gefüllt wird, die Blase durch den Druck des Wassers so in die Höhe getrieben und so straff ausgespannt, daß der ganze Verlauf des feinen Adernetzes in ihr sichtbar hervortritt. Der Druck des Wassers in der engen Röhre, abhängig von dem Durchmesser der Weite und dem Höhenstandpunkte, wird in dem niedrigen Gefäße so viel mal vermehrt, als wie viel mal der Querschnitt des letztern größer ist als der der engen Röhre. Sind die Durchmesser 1 und 6^{cm}, so sind die Querschnitte $\pi \cdot \frac{1}{4}$ und $\pi \cdot 36 \square^{cm}$ und ihr Verhältniß $\frac{1}{144}$. Ist der Höhenunterschied gleich $1^{m} = 100^{cm}$, so ist der Druck auf jedem Quadratcentimeter der Blase = 100 Gr., also auf der ganzen Fläche derselben = 14400 Gr. = 14,4 Kilogramm. Wird inmitten der Blase ein Loch gebohrt, so springt das Wasser aus demselben hervor, und müßte der aufspringende Strahl eine Höhe von 100^{cm} erreichen, was indeß des Luftwiderstandes halber nicht ganz der Fall ist. Der erste Apparat stellt uns den sogenannten anatomischen Heber dar, die Abänderung desselben einen kleinen künstlichen Springbrunnen. Ist zur Anbringung der zweiten engen und langen Röhre kein Platz, so kann man das Gewicht des drückenden Wassers auch durch Beschwerung eines in der Röhre befindlichen und luftdicht eingefaßten Kolbens ersetzen, und dabei von der Dampfmaschine Gebrauch machen. Die Natur liefert

in den hoch im Gebirge entspringenden Quellen das Material zu natürlichen Springbrunnen. Man hat die Quellen nur in Gefäße einfließen zu lassen, die man theilweise abschließt, es springt dann ein Wasserstrahl hervor als das Resultat der Druckhöhe zwischen der Lage der Quelle und des auffangenden Gefäßes. Die sogenannten artesischen Brunnen verdanken nicht minder diesen Verhältnissen ihre Entstehung. Ist eine Thalmulde so beschaffen, daß eine dem Wasser undurchgängige Schicht zu Tage tritt, und zur Unterlage eine durchgängige und diese wieder eine undurchgängige Schicht hat, welche alle drei auch an den Thalrändern emporsteigen und oben auf der Höhe sichtbar hervortreten, so dringt das atmosphärische Wasser in der mittlern Schicht durch ihre ganze Ausdehnung hindurch herein und sammelt sich namentlich in der Tiefe derselben an. Durch Anlegung eines Bohrloches über dieser erhält man nun in demselben ein steigendes Wasser, sobald die erste undurchgängige Schicht durchbrochen wurde, und der Brunnen ist fertig. Die erste Anlage solcher Brunnen fand in der Grafschaft Artois statt, und daher datirt sich der Name. Der Anlage selbst muß eine geognostische Untersuchung der Bodenbeschaffenheit vorhergehen, die in den meisten Fällen keine Schwierigkeit macht, sobald erfahrene Männer dieselbe anstellen.

Auch die Bramah'sche Presse ist nach diesen Bemerkungen leicht zu begreifen. Zwei Cylinder, ein enger und ein weiter stehen durch eine Röhre mit einander in Verbindung, beide haben einen luftdicht schließenden Kolben. Der des ersten ist mit einem senkrechten Gestänge verbunden, das durch einen Hebelarm herabgedrückt werden kann. Derselbe ruht fest auf einem Fundamente in einem mit Wasser gefüllten Raume, und hat eine Bodenöffnung mit einer Ventilklappe, die sich nach dem Boden hin schließt. Beim Niederdruck schließt sich das Ventil, und das Wasser wird mit Gewalt in die seitwärts angebrachte Verbindungs-Röhre gepreßt, die zum großen Cylinder führt. Beim Aufzuge öffnet sich das Bodenventil des engen Cylinders, weil durch das Herauspressen des Wassers ein luftleerer Raum entstanden ist, und das Wasser aus der seitlichen Röhre eines in ihr angebrachten

Ventils halber, das sich für die Röhre nach außen hin schließt, nicht zurückfließen kann. So wird neues Wasser in den engen Cylinder eingepreßt, und wieder in Folge des Niederdrucks durch die Seitenröhre zum großen Cylinder getrieben, dessen Kolben sich nun mit einer dem Drucke entsprechenden Kraft heben muß und über ihm lagernde Gegenstände gegen eine feste Wand pressen oder über ihm lagernde Lasten zu einer bestimmten Höhe heben kann. Ist die am Hebelarme wirkende Kraft = 25 Kilogramm, der Hebel selbst ein ungleicharmiger, dessen Arme im Verhältnisse von 1 : 20 stehen, so ist die Kraft auf den kleinen Kolben mit einem Durchmesser von $\frac{1}{2}$ cm gleich 500 Kilogramm. Durch einen Kolben von 24cm im weiten Cylinder wird die Druckkraft um das 2304fache vermehrt, so daß die ganze Kraft = 2304 · 500 Kilogramm = 1152000 Kilogramm sein wird, von denen etwa $\frac{1}{4}$ der Bewegungshindernisse halber abzurechnen sein wird. Der Erfinder wandte diese Maschine zuerst beim Bau der Brücke über den Menai-Canal nach der Insel Anglesee an, jetzt ist sie gewöhnlich in Oelmühlen, Rübenzucker-, Papier- und Stearinfabriken und wird überall zur Bewegung großer Lasten z. B. zum Krümmen der Schiffspanzer, zum Einpressen von Luft in weite Räume und dergl. verwendet. Aehnlich ist der sogenannte hydraulische Widder, durch den aus einem Windkessel vermittels einer demselben entspringenden Steigröhre Wasser in die Höhe gehoben wird, nachdem dasselbe aus einem Canale in demselben Aufnahme gefunden, und durch Klappen und Ventile zu stoßweisen Wirkungen gelangt ist; der Canal wird durch strömendes Wasser gespeist.

Das Gesetz der communicirenden Röhren erfordert für verschieden schwere Flüssigkeiten die Erweiterung, daß diese sich in den Schenkeln nach ihrer Schwere ordnen, so daß eine n mal schwere Flüssigkeit n mal so niedrig in ihrem Schenkel steht, als die leichtere in dem zweiten. Das interessanteste Beispiel hiervon ist eben das Barometer selbst. Die gesammte Atmosphäre ist der eine Schenkel und das Barometer der andere, der mit Quecksilber gefüllt nur eine Höhe der Füllung von 76cm erreicht. Die Weite der Schenkel kommt eben nicht in Betracht, und dieser

Umstand ist es grade, der die bequeme Druckangabe macht, die unabhängig von der Größe der gedrückten Stelle ist. Der Druck einer Atmosphäre ist also der Druck einer Quecksilbersäule von $760^{mm} = 76^{cm}$ also $= 76$ Gr. 13,59 wenn die gedrückte Stelle $= 1 \square^{cm}$ und 1^{cm} Cub. Wasser $= 1$ Gr. oder 1^{cm} Cub. Quecksilber $= 13{,}59$ Gr. Hierbei ist noch daran zu erinnern, daß die atmosphärische Luft mit dem flüssigen Wasser wohl die leichte Beweglichkeit der Theile gemein hat, also auch den Druck allseitig fortpflanzt, dabei aber auch durch ihre Elasticität den ausgehaltenen Druck durch Gegendruck kund gibt. Die Luft in unsern Zimmern ist mit der Außenluft in gleichen Höhenlagen gleichmäßig gedrückt, und übt demnach auf andere Körper einen Gegendruck aus, der im Zimmer ebenso groß sein muß als im Freien. Man nennt das im Speciellen die Dichte der Luft, ein Begriff der Anfängern mehr Schwierigkeit zu machen pflegt als man anzunehmen geneigt ist. Diese Dichtigkeit äußert sich auch als Zusammendrückbarkeit, die bei der Luft bis auf 27 Atmosphären dahin geprüft ist, daß eine Atmosphäre Luft absperrt und dem genannten Drucke ausgesetzt auch nur den 27. Theil des frühern Raumes einnimmt. Hierin liegt das 1660 von Boyle in England erfundene und von Mariotte in Frankreich bestätigte, nach dem letzten benannte Gesetz ausgesprochen: die Dichtigkeit der Luft wächst proportional mit ihrer Elasticität also auch mit den drückenden Kräften und umgekehrt proportional den Räumen, in denen sie eingeschlossen ist. Anwendung findet dieses Gesetz ganz direkt bei den Manometern, in denen die Druckkraft des Wasserdampfes gemessen wird. Hat man nämlich einen mit Quecksilber theilweise gefüllten eisernen Kasten und führt über die Oberfläche des Quecksilbers gespannte Dämpfe, so wird das Quecksilber in einer eingetauchten Röhre in die Höhe steigen und dadurch den Druck in Atmosphären angeben. Es erfordert aber ein Druck von 3 Atmosphären schon eine Länge dieser eingetauchten Säule von $3 \cdot 76^{cm} = 2{,}28$ Meter, was nicht immer bequem ist, deshalb verwandelt man dieses sogenannte offene Manometer in ein geschlossenes, indem man den gespannten Dampf in mit Luft gefüllte und mit Quecksilber geschlossene Röhren

preßt, und die Weiten durch Theilstriche bemerklich macht, welche dem Drucke von einer oder mehren Atmosphären entsprechen. — Flüssige Körper sind im Gegensatze zu luftförmigen fast gar nicht zusammendrückbar und man hat bei einem Drucke von 100 Atmosphären nur eine Volumenveränderung von 0,005 gefunden. Eine Atmosphäre entspricht einer Wasserhöhe von etwa 10 Meter, also muß man ungefähr 1000 Meter in das Meer hinabsteigen, um eine Verdichtung des Wassers von 0,005 anzutreffen. Der Druck, aber der in einer solchen Tiefe herrscht, ist ganz beträchtlich; wenigstens werden hermetisch verschlossene Gefäße zerdrückt oder mit Seewasser angefüllt. Auch eine mit einer beliebigen Flüssigkeit angefüllte und dicht verkorkte Flasche wird durch den Druck des Wassers in der Tiefe in den Fall der Endosmose gebracht, so daß also das Wasser einen mehr oder minder großen Theil der Flaschenflüssigkeit ersetzt. In der Luft hat der menschliche Körper eine große Last zu tragen. Seine Oberfläche beträgt ungefähr $1{,}5^{m}\square = 15000^{cm}\square$, und die Belastung durch die Luft ist also $76 \cdot 15000 \cdot 13{,}59 = 203850 \cdot 76$ Gr. $= 15492$ Kilogramm. Diese große Last wird uns wegen des Gegendruckes in unsern Innengefäßen, die ebenfalls mit gleich dichter Luft angefüllt sind, nicht bemerkbar: sobald aber durch Besteigung hoher Berge das Gleichgewicht gestört, der äußere Luftdruck herabgemindert worden, entstehen im Innern des Körpers Gefäßzerreißungen und das Blut dringt durch Nasen- und Ohrenwandungen hervor.

18. Auf dem Gesetze der communicirenden Röhren beruht das Aufsteigen von Flüssigkeiten in luftleer gemachte Räume, eine Erscheinung, die schon mehrmals im Vorübergehen erwähnt und benutzt worden ist. Das einfachste Instrument ist hier ein Knabenspielzeug, die bekannte Spritzbüchse aus Hollunder. Nachdem ein mäßig langer Hollunderstab ausgehöhlt worden, verschafft man sich einen in die gewonnene Lichtung passenden Stab, an dessen unterm Ende durch Zersplitterung der Holzfasern ein luftdicht schließender Kolben sich bilden läßt. Das eine Ende der Hollunderbüchse wird durch einen Holzpfropfen verschlossen, der in seiner Mitte durch eine Stecknadel durchbohrt ist. Das Instru-

ment ist fertig. In Wasser hineingehalten, wird durch Aufziehen des Kolbens im Innern der Büchse ein luftleerer, oder wenigstens doch ein luftverdünnter Raum hergestellt, in den nun das Wasser durch das feine Loch des abschließenden Stopfens wegen des äußern Luftdrucks auf der äußern Wasserfläche hineindringt und durch Niederdrücken des Kolbens in einem feinen Strahle herausgepreßt werden kann. Trinken, Saugen, Rauchen, sind ähnliche Erscheinungen, die ganz dieselbe Erklärung zulassen. Der aus losen Blättern zusammengewundene Tabakskegel — die Cigarre —, wird am untern Ende angezündet, am obern durch Saugen mit dem Munde in den durchgehenden feinen Canälen luftleer gemacht, und somit der entstehende Rauch durch die Cigarre wegen des äußern Luftdruckes hindurchgepreßt. Gerade so verhält es sich mit dem Saugen junger Thiere an den Zitzen der Mutterthiere. Beim Trinken wird durch das Einziehen der Luft über der Flüssigkeit ein luftverdünnter Raum geschaffen, in den sie nun hineindringt und weiter in die Mundöffnung aufsteigt.

Die Hollunderspritzbüchse ist in der Klistirbüchse vollkommener nachgebildet; sie gibt aber auch die Idee der Luftpumpe. Ein gut gebohrter Messingcylinder, der auf passende Gefäße luftdicht aufgeschraubt werden kann, hat einen luftdicht schließenden durchbohrten Kolben, der sich durch ein Gestänge mit der Hand auf und ab bewegen läßt. Ueber der Durchbohrung des Kolbens ist eine Lederklappe angebracht, welche sich nach Außen öffnen kann, so daß, wenn der Kolben aufgezogen wird, das Ventil durch den äußern Luftdruck sich schließt und unten im Cylinder ein luftleerer Raum entsteht, in den nun die Luft aus dem Gefäße, auf welchem der Cylinder aufgeschraubt ist, eindringt. Beim Niederdrucke muß sich das Ventil öffnen, die abgeschlossene Luft wirkt der beweglichen Lederklappe entgegen. Das geschieht um so mehr, wenn die Communication mit der äußern Luft durch eine feine Oeffnung oben am Cylinder vermittelt ist, welche beim Niederdrücken durch die Fingerspitze sich schließen läßt. Durch mehrmaliges Aufziehen und Niederdrücken des Kolbens wird also die Luft in dem Gefäße unter dem Cylinder in hohem Grade

verdünnt; die einstiefligе Luftentleerungspumpe ist vollendet. Dieselbe wird sofort in eine Luftverdichtungspumpe umgeschaffen, wenn man das Ventil an der untern Seite des Kolbens anbringt und nach dem Innern der Flasche hin sich öffnen läßt. Beim Aufziehen des Kolbens öffnet sich das Ventil, während die Oeffnung oben am Cylinder verschlossen ist, so daß nun alle Luft in dem ganzen Apparate unter dem Kolben sich befindet. Geht derselbe herab, so schließt sich das Ventil, und in dem Gefäße ist die ursprüngliche Luft und die des Cylinders. Beim zweiten Aufzuge wird die Cylinderöffnung geschlossen, die Luft über dem Kolben wird allmälig im Cylinder zusammengedrückt, öffnet das Ventil und dringt unter dasselbe in die Flasche, die durch mehrmalige Wiederholung des Spieles mit verdichteter Luft gefüllt wird.

In diesen einfachen Formen finden die Luftentleerungs- und Luftverdichtungspumpen — Evacuations- und Compressionspumpen ihre Anwendung in den gewöhnlichen Wasserpumpen und in der Windbüchse. Was die erstere anlangt, so besteht die Wasserhebepumpe aus drei Theilen, dem Steigerohr, welches im Grundwasser steht und letzteres durch ein Sieb aufnimmt, dem Kolbenrohre und dem Sammelkasten mit dem Ausflußrohre. Das Kolbenrohr ist die eigentliche Luftpumpe, es ist mit dem obern Ende des Steigerohres, welches hier ein nach oben sich öffnendes Ventil hat, durch Schrauben und Flanschen fest verbunden. Der Kolben ist durchbohrt und hat ein zweites nach oben sich öffnendes Ventil unterhalb eines Bügels, an dem das Gestänge angebracht ist. Die Mechanik dieses Gestänges besteht darin, daß sich eine Mittelstange zwischen zwei festen Schiebestangen senkrecht auf und ab bewegt, selbst aber lose mit einer weitern Stange verbunden ist, an deren äußerstem Ende der sogenannte Pumpenschwengel gelenkartig angebracht werden kann. Oberhalb des zweiten Ventils oder der Hubhöhe des Kolbens ist der Sammelkasten mit dem Ausflußrohre; in denselben wird das Wasser hineingehoben. Es ist klar, daß das Wasser im Steigrohre nicht ganz 10 Meter emporsteigen kann. Von diesen Hebepumpen unterscheiden sich die Druckpumpen nur unwesentlich. Ueber dem

Ventil am Steigerohr befindet sich im Kolbenrohre ein Seitenrohr, welches durch ein nach demselben sich öffnendes zweites Ventil gegen ersteres abgeschlossen werden kann. Die Kolbenbewegung hebt nun das Wasser im Steigerohre über das Ventil empor und drückt es beim Niedergange in das Seitenrohr hinauf, aus welchem es nun in größeren Höhen herausfließen kann.

In der vollkommeneren Technik hat man Saug- und Druckpumpenwerke mit einander vereinigt, und doppelt wirkende Pumpen eingerichtet, um die Abwechslung von Saugen und Drücken, also die stoßweise Wirkung, zu vermeiden. Das Princip kehrt oftmals wieder und soll hier nicht näher auseinandergesetzt werden. Ersetzt man den Kolben durch ein cylindrisches Gehäuse, in welchem ein Flügelrad rasch sich herumdreht, und in welches Wasser durch eine Röhre, die sich am obern Ende theilt, so hineindringt, daß es auch in die innersten, von den Schaufeln gebildeten Räume gelangt, dann wird es durch die Bewegung selbst in dem zweiten Rohre, dem frühern Seitenrohre des Druckwerkes, emporgetrieben. Diese Pumpe als Wasserhebemaschine hat keine Ventile und Kolben, und gehört daher nur dem Namen nach hierher, ebenso wie die archimedische Schraube, die darin besteht, daß um eine horizontalliegende Welle mit Schwungrad eine Röhre schlangenförmig herumgewunden ist; am vordern Ende ist die Röhre am weitesten und schöpft hier das Wasser durch eine schaufelförmige Ausweitung, am andern Ende ist sie mit einer horizontalen Röhre in Verbindung, in welche ein drittes verticales Röhrenstück mündet, durch welches das Wasser gehoben wird. Auch die Centrifugalpumpe soll hier genannt werden, bei der sich ein verticaler, in zwei Armen auslaufender Cylinder um seine verticale Axe rasch herumdreht. Derselbe steht im Grundwasser, das nun durch die Schwungkraft emporgetrieben wird und ausfließt. Buttenpumpen, Bramah's oscillirende und Rotationspumpe, sowie die rotirenden Pumpen von Repsold und Dietsch, nebst den Effektberechnungen, sehe man im Berl. Physik. Lexikon Artikel Pumpe nach.

Die Windbüchse ist ein Cylinder, in welchem durch die Compressionspumpe die Luft sehr stark verdichtet ist. An den-

selben wird ein Flintenlauf angeschraubt, dessen Kugel durch ein im Cylinder befindliches Ventil mit großer Heftigkeit fortgeschleudert werden kann; eine Ladung reicht für mehre Kugeln aus. Der Cylinder mit der comprimirten Luft dient hier als Windkessel; derselbe kann noch in anderer Weise hergestellt werden, dadurch nämlich, daß durch eine Druckpumpe in einem mit Luft gefüllten Kessel gewaltsam Wasser hineingepumpt wird, welches nun seinerseits die Luft im Kessel comprimirt. Ist nun am Kessel eine Oeffnung, die durch einen Hahn verschließbar zu dichten Leder- oder Hanfschläuchen führt, so drückt die verdichtete Luft im Kessel auf das eingezwängte Wasser, welches nun nach Oeffnung des Hahnes gewaltsam durch die Schläuche zu beliebigen Stellen sich hinführen läßt. Das ist die Idee der Feuerspritze, die in mannichfaltiger Weise praktische Verwendung gefunden hat.

Diesen größern Apparaten stehen zwei kleine Handwerkszeuge gegenüber, es sind der Stechheber und der gekrümmte Heber. Der erstere ist ein kleines, meist kegelförmiges Gefäß, das unten in eine feine Spitze ausläuft, die abgebrochen eine kleine Oeffnung läßt; das obere Ende rundet sich kugelförmig zu und seine Oeffnung kann während des Gebrauches mit dem Daumen geschlossen werden. Der Stechheber wird in eine Flüssigkeit eingetaucht, dieselbe steigt nach dem Gesetze der communicirenden Röhren in ihm empor, und wenn man nun die obere Oeffnung schließt und den Heber aus der Flüssigkeit hervornimmt, so fließt aus der untern Oeffnung ein Weniges derselben aus. Dadurch entsteht über der Flüssigkeit im Heber ein luftverdünnter Raum, und der Luftdruck an der untern Spitze des Hebers wird größer als der unter dem schließenden Daumen. Die Flüssigkeit bleibt im Heber und fließt erst heraus, wenn der Daumenverschluß ein wenig geöffnet wird. So kann man aus größern Gefäßen kleine Flüssigkeitsmengen als Proben auf eine bequeme und unschädliche Weise herausholen. Der gekrümmte Heber ist eine gebogene Röhre mit zwei ungleichlangen Schenkeln; wird der kürzere Schenkel in ein mit Flüssigkeit gefülltes Gefäß gesteckt und an dem andern Schenkel durch Saugen eine Luftverdünnung bewirkt, so fließt die Flüssigkeit des oben liegenden Gefäßes durch

die Röhre in ein tiefer liegendes, und ebenso in ein zweites und drittes. Das Instrument dient also zum Abzapfen größerer Wein- und Biergebinde in kleinere. Der Vorgang ist im Anfange klar, nur das Fortfließen macht Schwierigkeit, da an den Mündungen beider Schenkel des Hebers der Luftdruck gleich ist. Nimmt man aber ein Flüssigkeitstheilchen am obersten Punkte des Hebers, so wird dasselbe geschoben durch eine Luftsäule von der Höhe der Atmosphäre, deren Druck um die Flüssigkeitssäule im kleinern Schenkel vermindert wird, nach dem längern Schenkel hin, während der Gegendruck ebenfalls eine Atmosphäre ist, die aber um die Flüssigkeitssäule des längern Schenkels vermindert werden muß. Der Gegendruck ist mithin kleiner, und somit bewegt sich das Flüssigkeitstheilchen am höchsten Punkte des Hebers nach abwärts und das Fortfließen ist erklärt.

19. Die von Otto von Guericke 1650 erfundene Luftpumpe, die in ihrer wesentlichen Idee schon dargestellt ist, soll hier nach ihrer vollkommenen Form, wie sie als Hahnluftpumpe mit doppelten Stiefel in Gebrauch ist, beschrieben werden. Dieselbe ist zuerst von Fortin in dieser Weise construirt und später durch Babinet noch wesentlich durch Einführung eines zweiten Hahnes verbessert worden. Zwei Stiefel sind da, und ihre luftdicht schließenden Kolben werden durch gezähnte Gestänge und Stirnrad und Hebel so bewegt, daß der eine Kolben steigt, während der andere sich senkt. Eine Röhre geht aus jedem Stiefel in einen kegelförmig ausgebohrten Raum, welcher durch den sogenannten Graßmann'schen Hahn ausgefüllt ist. Durch seine Axe läuft nämlich von hinten bis ungefähr zur Mitte ein Canal, der aber hier bogenförmig sich zur Seite wendet, während von vorn ebenfalls bis fast zur Mitte in der Axe ein zweiter Canal verläuft, und nun bogenförmig zur entgegengesetzten Seite absetzt. Die Seitenöffnungen des Hahnes passen grade auf die Oeffnungen der Röhrenleitungen zu beiden Stiefeln. Der hintere Canal im Hahn steht mit einem ferneren Canal in Verbindung, der in die Mitte einer tellerförmigen Platte führt, auf welcher Apparate und Gegenstände unter Glasglocken von der äußern Luft abgeschlossen werden, und mit einem zweiten Canale, der

zu einem zweiten Recipienten führt, auf welchem ein abgekürztes Barometer sich befindet, welche sogenannte Barometerprobe zugleich den Grad der Verdünnung angibt. Daß hier ebenfalls Hähne zum Oeffnen und Abschließen vorhanden, braucht kaum erwähnt zu werden. Vorn am Graßmann'schen Hahn ist ein Hebel angebracht, durch dessen Drehung um 180° die beiden Durchbohrungen jetzt an den einen, dann an den andern Stiefel herantreten. Das Instrument ist von fast makelloser Vollkommenheit, und hat nur den Fehler des sogenannten schädlichen Raumes, die Röhren nämlich, welche vor den Stiefeln zu dem Hahne hinführen und mehr oder minder lufthaltig bleiben, so daß bei hergestellter Verbindung Luft in den Stiefel zurücktritt. Hier greift die Babinet'sche Verbesserung ein, deren Auseinandersetzung jedoch an diese Stelle überflüssig ist, wie auch besondere Apparate für besondere Zwecke, beispielsweise die Geisler'sche Quecksilberluftpumpe zur Luftentleerung der Geisler'schen Röhren, übergangen werden müssen.

Nicht aber dürfen übergangen werden die Versuche, welche sich mit der Luftpumpe anstellen lassen, weil sie allein wichtige Erscheinungen aufschließen. Zu diesen Versuchen gehören:

1. Die magdeburgischen Halbkugeln, die der Erfinder auf dem Reichstage zu Regensburg 1654 vorführte. Die beiden wohl abgeschliffenen Halbkugeln bilden eine ganze Kugel, die an beiden Polen mit Griffen versehen sind, während die eine einen Fortsatz trägt, der auf den Recipienten der Luftpumpe paßt und durch einen Hahn abgeschlossen werden kann.
2. Unter der Glocke des Recipienten fallen alle Körper mit derselben Geschwindigkeit.
3. Ebendaselbst treten aus Wasser und andern Flüssigkeiten Luftblasen hervor.
4. Erwärmtes Wasser kocht im luftverdünnten Raume der Recipientenglocke.
5. Rasch im luftverdünnten Raume verdunstendes Wasser gefriert, wenn eine nebengestellte Schale mit Schwefelsäure den Wasserdampf absorbirt.

6. Ein verschrumpfter Apfel wird im luftverdünnten Raume voll und rund, schrumpft aber noch mehr als vorher zusammen, wenn der Luftdruck von Außen wieder hergestellt ist.
7. Biere schäumen unter der Glocke lebhaft auf.
8. Eine zusammengedrückte Blase schwillt unter der Glocke auf und fällt nachher zusammen.
9. Das Ei hat unter der Schale und der feinen Außenhaut darunter eine Luftblase. Wird am entgegengesetzten Ende die Kalkschale, nicht aber die Haut entfernt, so tritt unter der Glocke das Ei aus der gemachten Oeffnung hervor, weil die in der Blase am andern Ende vorhandene atmosphärische Luft einen Druck nach oben hin ausübt.
10. Quecksilber wird durch Holz hindurchgedrängt, wenn unter demselben ein luftleerer Raum sich befindet — Quecksilberregen.
11. Brennende Körper verlöschen, Thiere ersticken im luftleeren Raume.
12. Der luftleere Raum pflanzt den Schall nicht fort, was an einer mit einem Uhrwerke verbundnen Glockenschelle unter einer luftleer gemachten Stopfbüchse gezeigt wird.
13. Die sogenannte Barometerprobe, deren schon oben gedacht ist, nach der sich das Quecksilber in beiden Schenkeln nahezu gleich hoch stellt.
14. In gewöhnlicher Wägungsmethode wird auf die Luft und den ihr entstammenden Widerstand bei verschiedener Größe der Wagschalen keine Rücksicht genommen. Unter der Glocke der Luftpumpe zeigt sich der Unterschied unzweifelhaft. Trägt der Wagebalken statt der Schale verschieden große Kugeln, so muß die größere Kugel um so mehr sinken, je luftverdünnter der Raum wird — Dasymeter.

20. Und hiermit kommen wir zu der wichtigen Materie des specifischen Gewichtes. Die Schwere des Körpers findet ihren Ausdruck im absoluten Gewichte, d. h. in der Angabe wie viel mal ein Körper schwerer ist als gewisse zu Maßeinheiten gemachte und gesetzlich festgestellte Gewichtssteine, die jetzt zumeist aus

Eisen oder Messing oder Platina hergestellt werden. Geschickter und von vielen Nebenrücksichten unabhängiger ist die Bezeichnung des specifischen Gewichtes, als des Quotienten der absoluten Gewichte gleicher Raumtheile verschiedener Körper, von denen der eine für feste und flüssige Körper das Wasser, für luftförmige Körper die atmosphärische Luft ist. Wird nämlich ein Körper in der Luft gewogen, so findet eben der Widerstand der Luft keine Berücksichtigung; wiegt man ihn aber unter Wasser, so findet man den Widerstand groß genug, der Gewichtsverlust ist in diesem Falle so groß als das Gewicht des aus seiner Stelle verdrängten Wassers. Dieses sogenannte archimedische Princip, welches sich aus sich selbst erklärt, hat die Veranlassung zu den in Rede stehenden Untersuchungen gegeben. Erhält man beispielsweise bei der angegebenen doppelten Wägung eines Stahlstückes die Werthe 15,6 und 13,6 Klgr., so ist das Gewicht einer gleich großen Wassermasse 15,6 — 13,6 = 2 Klgr., und mithin das specifische Gewicht $\frac{15,6}{2} = 7,8$, d. h. ein Stahlstück ist 7,8 mal so schwer als ein gleich großes Volumen von Wasser. Die doppelte Wägung eines festen Körpers, der im Wasser untersinkt und in demselben nicht löslich ist, hat keine Schwierigkeit, kann indeß bei wenig genauen Wagen durch die sogenannten Gewichtsaräometer bewirkt werden. Man nehme einen hohlen länglichen Cylinder, der einerseits abgerundet, andrerseits einen Bügel trägt, auf dessen Mitte ein kürzeres Stäbchen gesetzt ist, das nun seinerseits eine flache Schüssel trägt. Der Apparat ist unten sehr schwer und schwimmt daher lothrecht im Wasser (siehe weiter unten), indem er bis zu einer durch eine Marke bestimmten Stelle am Halse einsinkt, wenn man die Schüssel mit Gewichtssteinen belegt hat. Legt man nun statt einiger Steine den Körper auf, während der Apparat bis zur Marke eintaucht, so geben die weggelegten Steine das absolute Gewicht des Körpers, legt man denselben aber nicht auf die Schüssel, sondern unterhalb derselben in den Hohlraum des Cylinders, aus dem er zugleich Wasser herausdrängt, so hat man für das Einsinken bis zur Marke nicht so viel Gewichtssteine

fortzunehmen, die fortgenommenen geben aber das absolute Gewicht des verdrängten, also mit dem Körper gleich voluminösem Wassers an, beide Gewichte liefern als Quotienten das specifische Gewicht. Das specifische Gewicht flüssiger Körper bestimmt man durch Doppelwägung eines Gläschens mit wohl abgepaßtem Stöpsel, wenn dasselbe einmal mit Wasser, das andere Mal mit der gewählten Flüssigkeit gefüllt ist. Im Wasser lösliche feste Körper behandelt man erst mit solchen Flüssigkeiten, die den Körper nicht auflösen, und macht dann eine leichte Rechnung. Ist das specifische Gewicht des Steinsalzes gegen Alkohol = 2, 78 und das des Alkohols gegen Wasser = 0,79, so ist das specifische Gewicht des Steinsalzes gegen Wasser = 2, 78 · 0,79 = 2, 19 · · = 2, 2. Feste Körper, welche leichter als Wasser sind, werden mit schwereren in Verbindung gebracht und dadurch ihrem specifischen Gewichte nach bestimmt. Es versteht sich von selbst, daß Temperatur und Beschaffenheit des Wassers, das zur Vergleichung dient, bestimmt qualificirt sein müssen; man meint bei den wissenschaftlichen Angaben der specifischen Gewichte destillirtes Wasser von 0°. Zur Bestimmung des specifischen Gewichtes der Flüssigkeiten dient auch wohl das Skalenaräometer. Dasselbe ist eine gläserne Röhre, die sich in zwei Kugeln am unteren Ende erweitert, in deren kleinerer und zu unterst gelegener sich Quecksilber befindet, damit der Apparat senkrecht im Wasser schwimme. Je leichter die Flüssigkeit ist, in der er eingetaucht wird, desto weniger sinkt er ein, und aus diesem mehr oder minder tiefen Einsinken, welches an der Röhre des Apparates durch Marken bezeichnet ist, macht man den Rückschluß auf das specifische Gewicht der Flüssigkeit. Von diesen Skalenaräometern unterscheiden sich die Milch-, Bier-, Branntweinwagen insofern, als deren Skalen nach Procenten der Mischung der einen dieser Flüssigkeiten mit Wasser festgestellt sind.

Die specifischen Gewichte der Luftarten sind leicht zu bestimmen; man wiegt eine mit atmosphärischer Luft gefüllte Kugel, pumpt dieselbe leer, wiegt sie, füllt sie darauf mit einer andern Gasart, wiegt nochmals und hat dadurch das absolute Gewicht der atmosphärischen Luft und das der Gasart, dadurch auch ihren

Quotienten, das ist das specifische Gewicht der angewendeten Gasart. Einige Zahlen müssen dem Gedächtniß eingeprägt werden.

Platin	22	Schwerspath	4,43	Tannenholz	0,70
Gold	19	Marmor	2,83	Korkholz	0,24
Blei	11,4	Quarz	2,65	Quecksilber	13,59
Silber	10,5	Gyps	2,31	Schwefelsäure	1,85
Kupfer	8,88	Alabaster	1,87	Salpetersäure	1,52
Stahl	7,82	Engl. Flintglas	3,44	Salzsäure	1,19
Schmiedeeisen	7,79	Böhm. Krystallglas	2,89	Milch	1,03
Gußeisen	7,21			Meerwasser	1,03
Zink	7,21	Gewöhnl. Flaschenglas	2,60	Rheinwein	0,99
Calcium	1,55			Leinöl	0,95
Kalium	0,98	Elfenbein	1,92	Alkohol	0,79
Natrium	0,97	Wachs	0,97	Sauerstoff	1,10
Jod	4,95	Eis	0,88	Stickstoff	0,97
Crom	2,97	Ebenholz	1,23	Ammoniak	0,60
Schwefel	2,03	Eichenholz	1,17	Wasserdampf	0,62
Kohle, Diamant	3,52	Buchenholz	0,80	Wasserstoff	0,068

Man sieht, daß die Metalle im Durchschnittsgewichte von 10 vorzugsweise das Prädikat schwer in Anspruch nehmen können, wenn gleich die leichten Metalle Kalium, Calcium und Natrium so leicht oder leichter als Wasser, und die ganz schweren, Gold und Platin, doppelt so schwer sind. Die andern festen Körper: Erden, Steine, Brenzen oder Feuererreger, Gläser, halten sich in den Grenzwerthen von 2 bis 4, während die Holzarten meist leichter als Wasser sind. Das specifische Gewicht der Flüssigkeiten, mit Ausnahme des Quecksilbers, ist nicht sehr weit vom Gewichte des Wassers verschieden, und auch die Luftarten haben, mit Ausnahme des Wasserstoffes, der als der leichteste aller Körper auftritt, ein der atmosphärischen Luft ungefähr gleichkommendes Gewicht.

21. Ein Körper, welcher leichter ist als Wasser, schwimmt auf demselben, ein mit dem Wasser gleichschwerer Körper kann an jeder Stelle des Wassers liegen, ein Körper, der schwerer ist als Wasser, sinkt zu Boden. Ein Körper, der leichter ist als

Luft, steigt in derselben empor, bis sein specifisches Gewicht dem der Luftschicht gleich geworden, ein Körper, der schwerer ist als eine Luftschicht in der Höhe, sinkt so tief, bis er eine Luftschicht von gleicher Dichte mit der seinigen erreicht hat. Die vielfach nachgesprochene Meinung, daß das Meerwasser gleich der atmosphärischen Luft in Schichten von verschiedener Dichtigkeit zerfalle, daß also beim Herabsinken des Bleilothes einmal eine Wasserschicht sich finde, deren specifisches Gewicht gleich dem des Bleies und dieses nun nicht mehr sinke, ist eine durchaus irrthümliche; es sinkt zu Boden, wenn nicht andere Verhältnisse, wie Meeresströmungen, submarine Pflanzen hindern. Soll ein schwerer Körper auf Wasser schwimmen, so bringt man ihn entweder mit leichten Körpern in Verbindung — Eisenstäbe auf Korkholz — oder man gibt seinem Volumen eine so große Ausdehnung, daß das Gewicht des verdrängten Wassers größer wird als das des Körpers selbst; eiserne und kupferne Kessel, beladene Schiffe u. dergl. Für diese letztere Bedingung muß die Stabilität des Gleichgewichts hergestellt werden, damit die ausgehöhlten Körper nicht umschlagen, sich mit Wasser füllen und so untersinken. Diese Stabilität ist im Allgemeinen hergestellt, wenn der Schwerpunkt des verdrängten Wassers tiefer liegt als der Schwerpunkt des Körpers. Liegen beide im selben Lothe, so ist das die geeignetste und sicherste Lage, treten Schwankungen ein, so ziehe man durch beide Schwerpunkte lothrechte Linien, dieselben werden sich im sogenannten Metacentrum schneiden, und so lange dieses höher liegt als der Schwerpunkt des schwimmenden Körpers, ist die Sicherheit vor dem Umschlagen gewährleistet. Körper von stab- oder cylinderförmiger Gestalt schwimmen nicht selten im Wasser, indem ihre die Breite überragende Längsaxe sich lothrecht auf der Wasserfläche stellt; das leiseste Schwanken führt aber dann ein Umschlagen herbei, die Längsaxe legt sich der Wasserfläche horizontal. In diesem Falle gibt man dem einen Ende der Längsaxe eine größere Schwere und dann ist auch in der erstern Lage das Gleichgewicht ein stabiles, wie es oben schon bei den Aräometern auseinandergesetzt ist.

Nach dem vorhin Auseinandergesetzten läßt sich noch die

Luftschifffahrt hier ohne Weiteres anreihen, das Verständniß fordert keine Zusätze, einige historische Andeutungen können dafür genügen. Montgolfier füllte seinen Luftballon mit erwärmter Luft, die durch Strohfeuer unterhalb des Ballons durch eine weite Oeffnung desselben erhalten und unterhalten wurde. Die erste größere Montgolfière stieg am 5. Juni 1783 zu Anonay auf; den Fallschirm erhielt der Apparat 1784. Die Charlière, nach ihrem Erfinder Charles so genannt, ist derselbe Luftballon, nur ist er mit dem leichtesten aller Gase, dem Wasserstoff, gefüllt. Charles stieg mit seinem Ballon, dem unten eine Gondel angehängt war, am 1. December 1783 in den Tuilerien auf. Der Wasserstoff erwies sich jedoch aus mehren Gründen als unzuverlässig, einmal dringt er durch die Wände des Ballons leicht hindurch, sodann zerreißt er dieselben nicht selten, weil seine Ausdehnung in dünnen Luftschichten mit ziemlicher Gewalt erfolgt, und das Auskunftsmittel, Gas ausströmen zu lassen, weiter unten im Luftkreise die Fahrt unsicher macht, endlich ist die Herstellung des Gases selbst zu theuer, um einen ausgedehnten Gebrauch zuzulassen. Verbindungen der Montgolfieren mit Charlièren hatten keinen Erfolg; erst der Engländer Green nahm als Füllungsmaterial das leicht und billig herzustellende Leuchtgas, und dasselbe wird auch von seinen Nachfolgern verwandt.

Die Luftschifffahrt ist für Kriegszwecke verwandt zu Fleurus 1794, Venedig 1849 und Paris 1870, und zu wissenschaftlichen Untersuchungen von Biot und Gay Lussac 1804, von Barral und Bixio 1850, von der Sternwarte zu Kiew 1852 und von Glaisher seit 1862 unter den Auspicien der British-Association.

22. Wenngleich schon im §. 9 des ersten Abschnitts einige Thatsachen über molekulare Wirkungen der Flüssigkeiten und Luftarten beigebracht sind, so müssen dieselben hier doch wesentlich ergänzt werden. Die Erscheinung der Capillarwirkungen, nach denen netzende Flüssigkeiten in engen Röhren einen höhern Stand annehmen, als es das Gesetz der communicirenden Röhren gestattet, erklärt sich nicht unschwer dadurch, daß an den Rändern der Flüssigkeit in diesen engen Röhren die äußersten Moleküle höher steigen und sie selbst im ersten Augenblicke eine concave Fläche

bildet, die der engen Röhre halber sich alsbald zu einer Ebene ausgleicht, worauf das Spiel der Anziehung von Seiten der Röhrenwände von Neuem beginnt, und ebenso von der Ausgleichung der concaven Flüssigkeitsfläche zur ebenen gefolgt wird. In einer Röhre von 1^{mm} Weite steigt Wasser 30^{mm}, Weingeist 12^{mm}, Terpentinöl 13^{mm} hoch; ist die Röhre nur $0{,}1^{mm}$ weit, so sind die entsprechenden Zahlen 300, 120 und 130. Die gegebene Erklärung reicht nicht aus, weil nach derselben die Flüssigkeit höher und höher steigen müßte. Eben so wenig aber auch die andere, daß, weil im Röhrchen die Flüssigkeit eine concave Fläche bilde und deßhalb in den communicirenden Röhren die Flüssigkeitshöhen nicht gleich seien, eine Ausgleichung dieser Höhen zur Gleichmachung des innern und äußern Druckes stattzufinden habe; für diese Erklärung ist das Steigen im Capillargefäße zu hoch. Wenn weiter La Place und Gay Lussac gefunden, daß zwischen Parallelflächen von Glas die Flüssigkeit nur halb so hoch steigt als in geschlossenen Röhren, daß zwischen zwei gegen einander geneigten Wänden die Oberflächenform hyperbelartig ist, und daß endlich im herausgezogenen Haarröhrchen die Flüssigkeitssäule doppelt so hoch ist als im eingetauchten, so ist doch in diesen Erscheinungen noch manches unklar, was einer weitern Betrachtung unterbreitet werden muß. Für nicht netzende Flüssigkeiten ist bloß anzuführen, daß dieselben in Haarröhren convexe Oberflächenform annehmen und tiefern Stand zeigen als die Fläche im umgebenden Gefäße. Die Capillarerhebung verwandelt sich bei erhöhter Temperatur des Röhrchens in eine Depression, eine Erscheinung, die dieselbe Erklärung wie der Leydenfrost'schen Tropfen zuläßt.

Das gewöhnliche Leben bietet hierher gehörige Erscheinungen in Hülle und Fülle. Hand- und Trockentücher, Schwämme und Löschpapier ziehen Flüssigkeiten in ihren röhrenförmigen Zwischenräumen auf, ebenso Darmsaiten, trocknes Holz, lebende Pflanzen. In Mauern steigt die Erdfeuchtigkeit empor und macht die Wohn- und Schlafräume unwohnlich. Feuchter Thon wird auf Oelflecken in ungestrichenen Zimmerboden gestrichen, damit er beim Trocknen das Oel ausziehe. Papier wird angefeuchtet, damit es

beim Trocknen auf dem Brette, dem es aufgespannt werden soll, glatt aufliege. Stricke werden durch Anfeuchtung dicker und kürzer und entwickeln dabei eine solche Kraft, daß ein 960000 Pfund schwerer Obelisk im Jahre 1687 zu Rom damit aufgerichtet werden konnte. Das Aufziehen der Oele und brennbaren Flüssigkeiten in den Dochten der Lampen und Kerzen ist ebenso bekannt wie das Aufquellen der Samen in feuchter Erde und der dadurch ermöglichte Keimproceß. Pfähle werden in Felsenritzen eingeschlagen und benäßt, damit die Felsen auseinander springen. Stiele in Aexten und Hacken befeuchtet man, daß sie festsitzen, leck gewordene Fässer legt man in Teiche, um sie wieder wasserdicht zu machen. Das Quellen der Thür- und Fensterflügel im Winter ist nur durch Aufmerksamkeit zu verhüten, und Bäume kann man künstlich zum Früchtetragen bringen, indem man durch Einschnürung der Stämme die rückläufige Saftbewegung zu hindern sucht, was durch angelegte und angefeuchtete Stricke bewirkt wird. Abgenommene und trocken werdende Früchte befeuchtet man, damit das Wasser in das Innere eindringe und den verschwindenden Saft erhalte oder ersetze.

Und hiermit ist denn die specielle Erscheinung der Endesmose näher berührt. Sie besteht darin, daß zwei Flüssigkeiten von verschiedener Dichte und durch eine pflanzliche oder thierische Membran von einander getrennt, diese Membrane durchdringen und sich in einander ergießen jedoch so, daß von der leichtern Flüssigkeit mehr in die schwerere eindringt als umgekehrt, falls man dieses den Gesetzen der Schwere nicht anpassen sollte. Die Erscheinung kann man wahrnehmen namentlich bei Wasser und aufgelöstem schwefelsauren Kupferoxyd nach beiden Seiten hin, und sie ist der Grund des Aufsteigens der Flüssigkeiten in lebenden Pflanzen von der Wurzel her, die dünnflüssiger als die Pflanzensäfte sind, und deshalb von unten nach oben in größern Quantitäten eindringen, womit die Umkehrung von selbst gegeben, daß der schon fertig gewordene Pflanzensaft von oben nach unten sich wenden muß, und zwar in kleinern Mengen, weil er zum Aufsprossen neuer Triebe, Blätter und Früchte verwandt wird. Daß die Endesmose aber nicht reine Capillarer-

scheinung ist, zeigt sich darin, daß sie nicht an todten Exemplaren bemerkbar hervortritt, hier vielmehr nur immer reine Capillarerscheinung bleibt und niemals neues Leben gestaltet. Daß thierische Körper ebenfalls endosmotische Erscheinungen zeigen, namentlich in der Ansammlung der Lymphe aus den lymphatischen Gefäßen heraus, braucht kaum bemerkt zu werden.

Die Cohäsionsverhältnisse der Flüssigkeiten rufen noch eine Erscheinung hervor, die man wohl die Flüssigkeitshaut genannt hat. Beim Tropfen ist nämlich die äußerste dünne Schicht der Flüssigkeit consistenter als die andern Schichten, welche mehr dem Innern zuliegen und offenbar deshalb, weil sie nur eine einseitige Cohäsionsanziehung zu erleiden haben. Man nimmt das am besten bei hängenden Tropfen wahr, die nach dem Ausgießen von Flüssigkeiten aus einem Gefäße durch das Lecken und Zusammenfließen entstehen, und sich nicht selten kegelförmig verlängern ehe sie abfallen. Auch bei Flüssigkeiten mit horizontaler Oberfläche in Gefäßen zeigt sich die Erscheinung wie man an dünnen Stäbchen wahrnehmen kann, die beim Schwimmen wohl die Flüssigkeitshaut einbiegen, sie aber nicht durchbrechen und somit auch nicht benetzt werden.

Für luftförmige Körper gilt das schon früher erwähnte Gesetz der Diffusion der Gase, welches selbst durch poröse Körper hindurch wirkt, und somit endosmotische Erscheinungen zur Folge hat. Hier soll nur noch die sogenannte Lufthaut bei Luftblasen und an den Wänden der Röhren und Gefäße, in denen die Luftart aufbewahrt bleibt, erwähnt werden, da sie mit den Wasserhäuten eine gleiche Erklärung zuläßt. Ihre Existenz ist längst nachgewiesen selbst durch Anfertigung der Barometer, die vor der Füllung mit Quecksilber erst tüchtig ausgekocht werden müssen, damit nicht später Luftblasen sich einstellen. Neuerdings hat Waidele (1843) die Lufthaut zur Erklärung der sogenannten Hauchbilder benutzt. Wenn man auf Fensterscheiben mit der Fingerspitze Schrift- oder Bilderzüge macht, und dann auf die Fensterscheibe haucht, so verdichtet sich die Wasserdampfmasse zumeist auf den beschriebenen Stellen der Glasscheibe und macht diese durchsichtiger. Ohne Zweifel, denn die nicht beschriebenen Stellen waren durch Adhäsion der Lufttheile, die noch mit feinen

Staubtheilen vermengt waren, zur Aufnahme des Wasserdampfes nicht so zubereitet, als die beschriebenen, die eben durch den Akt der Beschreibung gereinigt worden.

23. Nach dem Principe des gleichmäßig und allseitig sich fortpflanzenden Druckes muß auch das Gesetz: der Druck auf die Wände eines Gefäßes ist abhänging von dem Flächeninhalte der gedrückten Stelle und der Länge des Lothes aus dem Schwerpunkte derselben bis an die Wasserfläche, unabhängig dagegen von der Form des Gefäßes erklärt werden. Dieser letzte Zusatz bezieht sich auf den Bodendruck, bei dem die Länge des Lothes gleich der Höhe der Wassersäule über der Bodenfläche ist. Die Wassereimer haben gewöhnlich eine kegelförmige Gestalt, und es ist dabei die kleine Grundfläche als Bodenfläche benutzt, wenn der Eimer mit den Händen oder an Tragstangen getragen wird, oder aber die größere Grundfläche als Bodenfläche anzusehen, wenn der Eimer auf dem Kopfe getragen werden muß, wie das in gebirgigen Gegenden zumeist zu geschehen pflegt. Im ersten Falle ist der Druck auf den Boden kleiner als die Gesammtheit des Wasserdrucks im ganzen Gefäße, im letztern bei weitem größer: dieser Druck kann aber nicht durch die Wage ermittelt werden, sondern erweist sich als einwirkend auf die Einfügung des Bodens in die Seitenwände des Gefäßes.

Von der Druckhöhe hängt auch die Ausflußgeschwindigkeit aus Boden- und Seitenöffnungen ab, also auch die bestimmten Wassermengen, die in einer bestimmten Zeit ausfließen. Die anzustellenden Rechnungen sind meistentheils selbst in ihren Ausgangspunkten auf den höhern Calcül zu gründen, und es können mithin hier nur historisch die entsprechenden Resultate mitgetheilt werden, welche im praktischen Leben mehrfach Verwendung finden. Um die Ausflußgeschwindigkeit aus Bodenöffnungen eines immer vollen Gefäßes zu finden, denkt man sich die Flüssigkeit in sehr dünne Schichten getheilt, die bei gegebener Bodenöffnung so nach einander herausfließen, daß die nächstfolgende stets in die Stelle der vorhergehenden in Folge ihrer eigenen Schwere tritt, ohne von den flüssigen Seitenwänden behindert zu werden. Es muß also eine Schicht von der Höhe h = der Höhe der Wassersäule

einmal in die Bodenöffnung gelangen und zwar durch den freien Fall, weil die Natur des Flüssigen keine nennenswerthe Behinderung hervorruft. Demnach ist die Ausflußgeschwindigkeit $v = \sqrt{2gh}$, weil h der Weg des Fallens und g der bekannte Werth für den freien Fall ist. Diese theoretisch nicht ganz richtige Formel entspricht der Erfahrung in keinem Falle. Zunächst ist zu bemerken, daß aus der Bodenfläche eine Schicht von gleicher Größe heraustritt, daß aber eine Schicht von gleicher Größe an ihre Stelle tritt nicht ohne die ihr so eben benachbarten Moleküle mit herabzureißen und die lebendige Kraft zu vermehren. Ist a die Bodenöffnung eines cylindrischen oder auch nur prismatischen Gefäßes, mit der Wasserfläche A in der Höhe h, so ist die schon von Daniel Bernoulli hergeleitete richtige Formel $v = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{\left(1-\frac{a^2}{A^2}\right)}}$ deren Nenner nur deshalb in den meisten Fällen weggelassen werden darf, weil a gegen A sehr klein ist. So daß dann $v = \sqrt{2gh}$ bestehen bleibt. Da nun $\sqrt{2g} = 4{,}43$, der theoretischen Ausflußmenge aber für dünne Wände der Erfahrungscoefficient $\frac{5}{8}$ gegeben werden muß, der sich bei Verdickung der Wände oder durch Ansatzröhren auf $\frac{13}{16}$ steigert, so erhält man für diese beiden Fälle die Formeln $v = 2{,}77 \sqrt{h}$ oder $v = 3{,}6 \sqrt{h}$.

Hat man conische Ansatzröhren von der Form des contrahirten Strahles gewählt, so ist der mit $\sqrt{h}$ zu multiplicirende Coefficient 4,26. Der Erfahrungscoefficient $\frac{5}{8}$ ist von Hagen durch Rechnung mit Berücksichtigung der Contraction des ausfließenden Wasserstrahles bestimmt und genau auf 0,619 angegeben worden. Im Folgenden soll wegen des wechselnden Werthes des mit $\sqrt{h}$ zu multiplicirenden Factors derselbe mit K bezeichnet werden, so daß man hat $v = K\sqrt{h}$. Setzt man nun $M =$ der Wassermenge, die in t Secunden aus der Bodenöffnung von der Größe a ausfließt, so ist diese gleich einem Prisma von der Grundfläche a und der Höhe $t \cdot v$, also ist $M = K a t \sqrt{h}$ und also $t = \frac{M}{K a \sqrt{h}}$ vorausgesetzt, daß das Gefäß immer mit Wasser gefüllt, die Druckhöhe also unverändert bleibt.

Die Contraction des ausfließenden Wasserstrahls begründet Hagen durch folgendes Raisonnement. „Die Voraussetzung ist sonach diese, daß das Wasser, indem es sich durch die Oeffnung in der dünnen Wand bewegt, verschiedene Geschwindigkeiten nach Maßgabe der Entfernung vom Rande der Oeffnung annimmt. Am Rande ist sie gleich Null, und nimmt gleichmäßig nach der Mitte hin zu, so daß sie daselbst ihr Maximum erreicht, und möglicher Weise auch größer sein kann als die Geschwindigkeit, die ein einzelnes Wassermolekül beim Herabstürzen aus der ganzen Druckhöhe annehmen würde. Die ganze lebendige Kraft dieses Wasserstrahles soll aber derjenigen gleich sein, die das Wasser durch seine Sinkung im Gefäße erleidet, es wird somit in jeder Zeiteinheit nicht ein Prisma, sondern ein Kegel austreten, der die Oberfläche der Grundfläche zur Basis hat, und dessen Höhe der Geschwindigkeit des mittlern Druckes gleichkommt.

Ist bei einem prismatischen Gefäße und bei einer rechtwinkligen Seitenöffnung die Breite der Oeffnung b, ihre Höhe h_1 während die constante Höhe des Wasserstandes h, so ist wenn noch $h - h_1 = \delta$

$$M = \tfrac{2}{3} K b t (h \sqrt{h} - \delta \sqrt{\delta})$$

und wenn $h_1 = h$ also $\delta = 0$

$$M = \tfrac{2}{3} K b t h \sqrt{h}$$

Da in dieser letzten Formel $b h$ gleich dem Flächeninhalte der Oeffnung, hier also gleich dem Flächeninhalte einer Spalte in der Seite des Gefäßes, so wird $M = \frac{2}{3} K a \sqrt{h}$, d. h. es ist die Wassermenge, welche aus einer bis zum Wasserstande reichenden Seitenöffnung ausströmt nur $\frac{2}{3}$ derjenigen Menge, welche aus einer gleich großen Bodenöffnung ausströmen würde.

Ist die Seitenöffnung kreisförmig mit dem Durchmesser d, so findet man

$$M = \frac{K t \pi d^2 \sqrt{h - \frac{1}{2} d}}{4} \left\{ 1 - \frac{1}{128} \left(\frac{d}{h - \frac{1}{2} d} \right)^2 - \frac{5}{16384} \left(\frac{d}{h - \frac{1}{2} d} \right)^4 \cdots \right\}$$

Ist ein prismatisches Gefäß mit dem Querschnitt A und der Bodenöffnung a nebst dem Wasserstande h vorhanden und die Aufgabe darauf gerichtet, daß kein Zufluß erfolgt, sondern

die Druckhöhe sich stetig mindern soll, so folgt für die Zeit t des Ausflußes der Wassermenge $A\,h$

$$t = \frac{2\,A}{K\,a}\sqrt{h} \text{ oder wenn man } M \text{ statt } h \text{ einführt}$$

$$t = \frac{2\sqrt{AM}}{K\,a}$$

Nach den vorigen hat man für den Abfluß M in der Zeit t_1 bei constanter Druckhöhe

$$M = K\,a\,t_1\sqrt{h} \text{ oder } t_1 = \frac{M}{K\,a\sqrt{h}} = \frac{A\sqrt{h},}{K\,a} \text{ so daß also}$$

$$t_1 = \tfrac{1}{2}\,t.$$

d. h. bei constanter Druckhöhe fließt in der halben Zeit ebenso viel Wasser heraus als in dem Falle, daß die Druckhöhe stätig abnimmt.

Ist das Gefäß kegelförmig, die größere Grundfläche A nach oben, die kleinere B nach unten gewandt, ist h die Höhe des Wasserstandes, dann ist die Zeit des Abflusses bei stätiger Abnahme des Druckes

$$t = \frac{2\,(\sqrt{A} - \sqrt{B})}{K\,a\sqrt{h}}\left(\sqrt{B} + \tfrac{7}{15}\,h\sqrt{B} + \frac{1}{5}\,h\sqrt{A}\right)$$

oder wenn die Grundflächen A und B Kreise sind mit den Radien π und ϱ

$$t = \frac{2\,\pi\,(r - \varrho)}{K\,a\sqrt{h}}\left(\varrho + \tfrac{7}{15}\,h\,\varrho + \tfrac{1}{5}\,h\,r\right).$$

Ist wieder ein prismatisches Gefäß gegeben, und in ihm eine rechtwinklige bis an den Wasserstand reichende Spaltöffnung mit der Breite b, so kann wenn A und h dieselbe Bedeutung von früher haben, zunächst das Wasser nicht gänzlich abfließen, die Zeit des Abflusses würde unendlich groß werden, weil die letzten Wassermengen nur tropfenweise hervorquellen würden. Man nimmt deshalb den Abfluß nur bis zu einer gewissen Höhe h, über dem Boden und findet dann

$$t = \frac{3\,A}{K\,b}\left\{\frac{1}{\sqrt{h_1}} - \frac{1}{\sqrt{h}}\right\}.$$

Reicht aber die Oeffnung vom Boden nur bis zur Höhe h bei einem Wasserstand H, so daß $H - h = \delta$ und h_1 die frühere

Bedeutung behält, dann ist die Herleitung einer exacten Formel sehr umständlich, und eine Näherungsformel

$$t = \frac{A}{Kb}\left\{\frac{4}{3}\,\frac{H\sqrt{H} - \delta r \delta}{h^2} + 3\left(\frac{1}{\sqrt{h_1}} - \frac{1}{\sqrt{h}}\right)\right\}$$

für die Zeit der Entleerung bis zur Höhe h_1 vom Boden ausreichend genug.

Diese Resultate sind aus des Verfassers Programmabhandlung: „Hydraulische Formeln für den Abfluß von Wasser aus Gefäßen" mitgetheilt, einerseits um eine Anschauung von der Mannigfaltigkeit der hier Platz greifenden Probleme zu geben, andererseits aber um zu zeigen, daß schon bei diesen verhältnißmäßig leichten Aufgaben die höhere Rechnung nicht entbehrt werden kann. Eine andere Reihe von Aufgaben, welche den behinderten Abfluß betreffen d. h. den Abfluß für den Fall, daß die Ueberlaßschwelle selbst im Wasser liegt und in der genauten Abhandlung ausgeführt ist, soll hier nur Erwähnung finden.

Zu erledigen bleiben noch die Bewegungen, welche durch den Rückstoß des Wassers im Segner'schen Wasserrade und des Dampfes beim Aufsteigen der Raketen hervorgerufen werden, die Bewegungen des Wassers in Flüssen und Canälen, in Röhrenleitungen für Bewässerungsanlagen und für Wasserheizungen so wie die ähnlichen der Luftarten bei Gasleitungen und Luftheizungen. Principiell handelt es sich bei allen diesen Problemen um die Druckkraft, die lebendige Kraft des ausströmenden Wassers oder Gases, die Geschwindigkeiten dieser, welche nicht so einfach sind wie es auf den ersten Blick scheinen will, und noch mehrere andere Umstände, die durch Rechnung und Erfahrung gleichzeitig erledigt werden müssen. Man findet das hierher gehörige in dem größeren Werke von Weisbach „Lehrbuch der theoretischen Mechanik, Braunschweig 1863 bei Vieweg" meist in populärer Form, specieller aber in den Werken von Eytelwein, Hagen und den Abhandlungen von Poiseuille, Jacobson, Darcy, sowie in der Abhandlung des Mitverfassers Dr. Lampe über die Danziger Wasserleitung die gegen 15000 Meter lang ist.

Dritter Abschnitt.

Wellenbewegungen.

Erstes Kapitel.

Wellenlehre als gemeinsame Grundlage der Lehren vom Schalle, vom Lichte und der strahlenden Wärme.

1. Eigenthümlichkeiten der Wellenbewegung. — Die Eigenthümlichkeiten der Wellenbewegung lassen sich am leichtesten an den Wasserwellen studiren. Wird die Oberfläche eines ruhenden Gewässers an einer Stelle erschüttert, z. B. durch einen hineingeworfenen Stein, durch Regentropfen 2c., so bildet sich um dieselbe eine kreisförmige Erhebung der Wasserfläche, Wellenberg genannt, welche mit scheinbar gleichmäßiger, in Wirklichkeit jedoch allmählig abnehmender Geschwindigkeit vorschreitet. Je mehr sich der Wellenkreis erweitert, desto geringer wird die Höhe der Welle, bis dieselbe endlich für die Wahrnehmung verschwindet. Dem ersten Wellenberge folgen in regelmäßigen Abständen noch mehrere andere, welche durch Wellenthäler von einander getrennt sind und von denen der nachfolgende immer etwas niedriger ist als der vorhergehende. Ein Wellenberg bildet mit dem darauf folgenden Wellenthale zusammen eine vollständige Welle. Die Gesammtlänge beider heißt Wellenlänge. Aus der Höhe des Berges und der Tiefe des Thales setzt sich die Wellenhöhe zusammen, die in großen Meeren 10 Meter und mehr betragen kann.

Ueber die Entstehung der Wasserwellen sei Folgendes bemerkt. Durch den in das Wasser geworfenen Körper wird zunächst eine gewisse Wassermasse verdrängt und es entsteht daher rings um die betreffende Stelle eine Druckvermehrung, welche sich nach allen Seiten mit gleichmäßiger Stärke verbreitet. Wegen der Incompressibilität des Wassers können die Theilchen aber nur nach oben hin ausweichen und es muß daher rings um den Erschütterungsmittelpunkt ein Wellenberg entstehen, bei dessen Herabsinken die Wirkung wieder auf die nächstfolgenden Theilchen übertragen wird. Nach dem Beharrungsgesetze geht bei der Rückbewegung jedes Theilchen über seine ursprüngliche Ruhelage wieder hinaus und macht, wie ein Pendel, in Folge der Einwirkung der Schwere mehrere Schwingungen, ehe es zur Ruhe gelangt; daher folgen dem ersten Wellenberge noch mehrere andere. Die Bildung der Wellenthäler ist eine unmittelbare Folge von derjenigen der Wellenberge, da das Volumen des Wassers ja dasselbe bleibt, also jeder Ausbiegung der Oberfläche an einer Stelle eine Einbiegung an einer andern entsprechen muß.

Befindet sich auf der Wasserfläche ein leichter schwimmender Körper, z. B. ein Blatt, so steigt und fällt dieses, während die Welle darunter fortgeht, kehrt aber schließlich wieder an seinen ursprünglichen Ort zurück. Allerdings findet das Auf- und Absteigen nicht in gerader Linie statt, sondern in einer nahezu kreisförmigen Bahn, indem das Theilchen, so lange es zum Wellenberge gehört, im Sinne der Weiterbewegung der Welle vorschreitet, beim Herabsinken in das Wellenthal wieder zurückkehrt. Die Wellenbewegung ist also wesentlich verschieden von der fließenden oder fortschreitenden. Das Fortschreiten der Welle besteht in einer successiven Uebertragung einer gewissen Form der Wasserfläche auf immer entferntere Stellen, welche dadurch vor sich geht, daß fortwährend neue Wassertheilchen in den Kreis der Bewegung hineingezogen werden. Weil wir denselben Anblick successive an verschiedenen Orten haben, scheint uns ein Weiterrücken stattzufinden, wie es auch z. B. der Fall ist, wenn wir eine um ihre Axe gedrehte Schraubenlinie (oder einen

Korkzieher) oder ein vom Winde bewegtes Getreidefeld betrachten.

2. Seilwellen. — Ist über einer Wasserfläche ein Seil horizontal ausgespannt, und wird auf dem Wasser eine Welle erregt, welche in der Richtung des Seiles fortschreitet, so sieht man auch in dem Spiegelbilde des letzteren eine wellenförmige Ausbiegung fortlaufen. Diesen scheinbaren durchaus analoge wirkliche Seilwellen entstehen, wenn man dem einen Ende eines quergespannten möglichst langen und biegsamen Seiles mit der Hand eine pendelartige oder auch drehende Bewegung gibt. Da bei jedem Hin- und Hergange der Hand eine Welle entsteht, so bildet sich auf dem Seile eine Reihe von fortschreitenden Wellen, welche unmittelbar auf einander folgen, so daß das ganze Seil allmählig in eine schlängelnde Bewegung geräth. Dabei macht jedes Theilchen der Schnur ähnliche Pendelbewegungen wie die Hand, welche indessen um so später eintreten, je weiter das betreffende Theilchen von dem bewegten Ende des Seiles entfernt liegt. Die Dauer jeder einzelnen Schwingung ist für alle Theilchen dieselbe. Die Summe der Ausweichungen eines Theilchens nach den entgegengesetzten Seiten von seiner Gleichgewichtslage nennt man die Breite der Schwingung oder Amplitude. Sie entspricht der Höhe bei den Wasserwellen.

3. Beziehung zwischen Wellenlänge und Fortpflanzungsgeschwindigkeit. — Aus der Art der Entstehung der einzelnen Seilwellen erkennt man leicht, daß die Wellenlänge zugleich die Strecke darstellt, um welche sich die Bewegung während einer Schwingung des Erregungspunktes fortgepflanzt hat. Die Wellenlänge ist demnach um so größer, je größer die Schwingungsdauer eines Theilchens ist und je schneller die Wellen fortschreiten. Machte die Hand in einer Secunde n ganze (hin- und hergehende) Schwingungen, und bezeichnet man die Wellenlänge durch l, so ist $n\,l$ der Weg, um welchen die Wellenbewegung in einer Secunde vorgeschritten ist, oder die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Nennt man die letztere c, so ist also

$$(a) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \; n\,l = c \;;\; l = \frac{c}{n}$$

der Werth von c hängt wesentlich von der Beschaffenheit des Mittels, in welchem die Wellen erregt sind, ab. Die theoretische Mechanik lehrt, daß c der Größe $\sqrt{\frac{e}{d}}$ proportional ist, wo e das Maß für die Elasticität, d die Dichtigkeit des Mittels bezeichnet.

4. Transversale und longitudinale Wellen. — Man nennt solche Wellen, bei welchen die einzelnen Theilchen eine Bewegung machen, welche auf derjenigen Richtung senkrecht steht, in welcher sich die Wellen fortpflanzen, transversale Wellen. Zu ihnen gehören also die Seil- und Lichtwellen. Findet dagegen die Bewegung eines Theilchens in derselben Richtung statt, in welcher die Welle vorschreitet, so hat man longitudinale Wellen. Von dieser Art sind die Luftwellen, welche, wenn sie unser Ohr treffen, eine Schallempfindung erregen. Zur Veranschaulichung der Fortpflanzung der Bewegung bei dieser Art der Wellen bietet die Mach'sche Wellenmaschine ein vortreffliches Mittel. Dieselbe besteht aus einer größeren Anzahl gleicher, ziemlich schwerer aber kurzer Cylinder, welche auf einer glatten horizontalen Bahn neben einander liegen, so daß ihre Axen parallel sind. Die letzteren sind durch federnde Ringe (deren Ebenen zur Grundfläche der Cylinder parallel sind) mit einander verbunden, jedoch so, daß die Cylinder nicht ganz am Rollen verhindert sind. Ertheilt man nun dem ersten Cylinder einen Stoß, so nähert er sich dem zweiten, dieser dem dritten u. s. f., und man kann nun, wenn das Verhältniß der Massen der Cylinder zu der Elasticität der Federn richtig bemessen ist, nicht nur die Fortpflanzung des Impulses, sondern auch die hin- und hergehende Bewegung jedes einzelnen Cylinders bequem verfolgen. Noch einfacher, wenngleich weniger vollkommen, läßt sich der erste Theil des Vorganges durch eine Reihe von Knaben darstellen, deren jeder die Hände auf die Schultern seines Vordermannes gelegt hat. Hier vertreten die Armmuskeln die Stelle der Federn.

5. Luftwellen. — Eine ganz ähnliche Bewegung wie die Cylinder in der Mach'schen Maschine macht eine Reihe von Theilchen der Luft, wenn dieselbe an einer Stelle erschüttert wird. Eine solche Erschütterung kann auf die verschiedenste Weise hervorgebracht werden, z. B. durch einen sich plötzlich ausdehnenden und wieder zusammenziehenden elastischen Ball, durch Zusammenschlagen zweier Körper, z. B. der Hände. Da das Gesetz der allseitigen Verbreitung des Druckes auch für luftförmige Flüssigkeiten gilt, die Lufttheilchen aber nicht wie die an der Oberfläche befindlichen Wassertheilchen nach einer Seite hin besonders leicht ausweichen können, die Luftarten endlich leichter zusammendrückbar sind, so bildet sich um den Mittelpunkt der Erschütterung eine kugelförmige Schicht verdichteter Luft, auf welche, entsprechend dem Wellenthale, eine Verdünnungsschicht folgt. Im Uebrigen sind die Verhältnisse durchaus den bei Wasser- und Seilwellen stattfindenden analog. Wie Wellenberg und Wellenthal, schreiten auch die Verdichtungen und Verdünnungen mit einer gewissen Geschwindigkeit fort. Wird an der Erregungsstelle eine pendelnde Bewegung der Lufttheilchen hervorgebracht, so wird sich in der umgebenden Luft, welche wir uns unbegrenzt und nach allen Richtungen von gleicher Elasticität denken, ein System von concentrischen Kugelwellen verbreiten, welche in Abständen von je einer Wellenlänge auf einander folgen. Die einzelnen Lufttheilchen machen dabei in der Richtung eines Radius der Kugelwellen Pendelbewegungen, wobei sie sich von ihrer ursprünglichen Lage nach entgegengesetzten Richtungen ungleich weit entfernen. Die Summe dieser Ausweichungen, welche der Wellenhöhe bei den Wasserwellen entspricht, nennt man „Wellenbreite" oder „Amplitude".

6. Verschiedene Phasen der Bewegung; Schwingungscurven. — Aus der Definition der Wellenlänge folgt, daß zwei Theilchen, welche um eine oder mehrere große Wellenlängen von einander entfernt sind, sich stets in demselben Schwingungszustande befinden oder, wie man sagt, dieselbe Phase haben, sich also (bei Transversalwellen) gleichzeitig heben und senken oder (bei Longitudinalwellen) gleichzeitig nach rechts und

ebenso nach links gehen; während zwei Theilchen, welche um 1, 3, 5 ꝛc. halbe Wellenlängen von einander entfernt sind, sich stets in entgegengesetztem Schwingungszustande befinden.

Zur Veranschaulichung dieser, sowie mancher anderer Verhältnisse, welche bei Wellenbewegungen vorkommen, dienen die sogenannten Schwingungscurven. Um die Entstehung derselben zu begreifen, zeichne man sich auf einem Blatte irgend eine möglichst regelmäßige Wellenlinie. Zur Hervorbringung derselben war es nothwendig, den Schreibstift einmal auf- und ab zu bewegen und zugleich ihn oder das Blatt seitwärts zu ziehen.

Nehmen wir an, daß dieses letztere mit gleichmäßiger Geschwindigkeit geschehen sei, so wird sich aus der Gestalt der Wellenlinie sofort erkennen lassen, ob die Aufundabbewegung eine regelmäßige war — ja es wird sogar jede plötzliche Zuckung der Hand in einer entsprechenden Veränderung der Krümmung erkannt und der Ort, an welchem sich der Schreibstift in einem beliebigen Zeitpunkte befand, bestimmt werden können. Eine solche Linie nun, aus deren Form man den Verlauf einer gewissen Bewegung, speciell einer Schwingung erkennen kann, heißt eine Schwingungscurve. Jeder Buchstabe, jedes Wort und jede Zeile, welche wir schreiben, kann man in gewissem Sinne als solche Curve ansehen, insofern aus ihnen die Art, wie der Schreibende die Feder geführt, aufs Deutlichste erkannt werden kann. Macht man z. B. eine Zeile m-Striche, so kann jeder, der dieselbe betrachtet, schließen, welche regelmäßig wiederholte Bewegung der Hand zur Erzeugung derselben erforderlich war.

7. Darstellung periodischer Bewegungen durch Schwingungscurven. Sinuscurve. — Bei physikalischen Betrachtungen sind von besonderer Wichtigkeit solche Schwingungscurven, durch welche periodische Bewegungen dargestellt werden. Man versteht darunter bekanntlich solche, welche nach Verlauf gewisser gleicher Zeitabschnitte, die man Perioden nennt, immer wieder auf dieselbe Weise verlaufen. Innerhalb jeder Periode kann die Be-

wegung dabei eine ganz beliebige sein. Die einfachste periodische Bewegung ist die eines Pendels. Man stelle sich nun vor, daß eine schwere, unten mit einer Spitze versehene Pendelkugel an einer Kette von einem Eisenbahnwagen herabhänge und in Transversalschwingungen (senkrecht zur Richtung der Schienen) versetzt sei. Ist nun zwischen den Schienen etwa lockerer Sand ausgebreitet und wird der Wagen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortbewegt, so zieht die Spitze der Kugel in dem Sande eine Furche, welche die Gestalt der Pendelcurve hat, die man aus weiter unten erörterten Gründen auch Sinuscurve nennt. Dieselbe ist offenbar eine regelmäßige Wellenlinie, deren Berge und Thäler zu beiden Seiten derjenigen mittleren geraden Linie regelmäßig vertheilt sind, welche von der Spitze beschrieben wird, wenn das Pendel ruhig herabhängt, während der Wagen weiter fährt. Die Durchschnittspunkte dieser Geraden und der Pendelcurve entsprechen den Zeitpunkten, in welchen das Pendel durch seine Gleichgewichtslage ging; während die höchsten Punkte der Berge resp. die tiefsten der Thäler den größten Elongationen, d. i. Entfernungen von der Gleichgewichtslage entsprechen. Die Strecke, um welche der Wagen während einer Schwingung des Pendels sich weiter bewegt hat, ist gleich der Länge einer Welle der Pendelcurve.

8. Mathematische Betrachtungen. — Wir bemerkten oben, daß man die Pendelcurve auch Sinuscurve nenne. Zur Erläuterung dieser Benennung und Ergänzung des oben Gesagten diene Folgendes. Man denke sich einen Lichtpunkt, welcher sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit auf der Peripherie eines Kreises bewegt. Befindet sich ein Auge in der Ebene dieses Kreises in derselben horizontalen Höhe wie sein Mittelpunkt hinreichend weit von ihm entfernt, so scheint diesem der Punkt auf einem senkrechten Durchmesser des Kreises hin und her zu pendeln, indem er an dem höchsten und tiefsten Punkte seiner Bahn einen Augenblick still steht und von beiden Seiten her mit beschleunigter Geschwindigkeit der Mitte derselben zueilt. Da nach der obigen Annahme der Punkt sich auf der Peripherie des Kreises mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt, so kann

man den von ihm durchlaufenen Bogen als das Maß der verflossenen Zeit ansehen. Als Ausgangspunkt der Bewegung diene der Endpunkt eines horizontalen Durchmessers der Kreisbahn. Fällt man auf diesen Durchmesser von dem Punkte, wo der Lichtpunkt sich gerade befindet ein Loth, so ist dieses nach dem frühern dem Sinus des durchlaufenen Bogens, also der Zeit proportional. Dasselbe gibt zugleich den scheinbaren Abstand des Lichtpunktes von der Mitte seiner Bahn an. Dieser ist also dem Sinus der Zeit proportional.

Ist der Radius des Kreises gleich der Maßeinheit, so ist sein Umfang 2π (wo π die sogenannte Ludolph'sche Zahl bedeutet), und wenn derselbe in T Secunden durchlaufen wird, so ist

der in einer Secunde durchlaufene Bogen $= \frac{2\pi}{T}$

" " t Secunden " " $= \frac{2\pi}{T} \cdot t$

wobei t veränderlich zu denken ist.

Bezeichnen wir den Radius des Kreises durch α und durch y den senkrechten Abstand des Lichtpunktes von dem festen horizontalen Durchmesser, so ist

$$\frac{y}{\alpha} = sin\ \frac{2\pi}{T} \cdot t \qquad 1.$$

Diese Gleichung, auf welche wir hier durch anschauliche Betrachtungen geführt wurden, ist, wie die theoretische Mechanik lehrt, der allgemeine Ausdruck des Gesetzes, nach welchem die Bewegung eines Punktes vor sich geht, der durch eine, seiner Entfernung von der Gleichgewichtslage proportionale Kraft in Bewegung gesetzt wird. Es ist dieses dieselbe Bewegung, wie sie, abgesehen vom Pendel selbst, u. A. ein Gewicht, welches an einer Spiralfeder hängt, oder ein Theilchen eines gleichförmig elastischen Mediums z. B. des Lichtäthers oder der Luft ausführt. Die obige Gleichung spielt daher eine Hauptrolle in denjenigen Theilen der Physik, bei denen es sich um die Schwingungen elastischer Medien handelt, und bildet sonach auch die Grundlage der theoretischen Optik und Akustik. Um den Nutzen dieser Formel zu zeigen, geben wir nachstehend einige einfache

Anwendungen derselben. Da für das Verständniß derselben die Kenntniß der Gesetze, nach welchen sich die Werthe des Sinus und Cosinus eines Winkels verändern, erforderlich ist, so schicken wir eine kurze Erläuterung darüber voraus.

Wir denken uns um den Mittelpunkt O einen Kreis geschlagen, dessen Radius wir gleich der Maßeinheit annehmen, und ziehen in demselben zwei auf einander senkrechte Durchmesser, AB und CD, deren Lage wir als unveränderlich betrachten. Der Umfang dieses Kreises, dessen Länge $= 2\pi$ ist, wird dadurch in 4 Quadranten, deren jeder gleich $\frac{\pi}{2}$ ist, getheilt, welche wir nach der Reihe resp. durch I, II, III, IV bezeichnen wollen. Wir unterscheiden ferner vom Mittelpunkte aus die entgegengesetzten Richtungen, so daß, wenn z. B. $OA = + 1$ angenommen wird, $OB = - 1$ zu setzen ist; dasselbe gilt bezw. von OC und OD. Wir ziehen uns nun in dem I Quadranten einen Radius OE, welcher mit dem festen Durchmesser AB den Winkel EOA bildet, dessen veränderlich gedachten Bogen AE wir durch x bezeichnen, und fällen von E auf OA ein Loth EF, so ist dieses $= sin\ x$, während $OF = cos\ x$ ist. Wächst nun der Bogen x von 0 bis $\frac{\pi}{2}$, so wächst $sin\ x$ von 0 bis $+ 1$ und nimmt dann wieder bis 0 ab, wenn der Winkel weiter bis π wächst. Zugleich nimmt $cos\ x$ ab von 1 bis 0, wird dann negativ und erreicht den Werth $- 1$. Bei weiterer Drehung um $\frac{\pi}{2}$ durch den Quadranten III, durchläuft $sin\ x$ alle Werthe von 0 bis $- 1$ und nimmt im IV Quadranten wieder von $- 1$ bis 0 zu, so daß also $sin\ 2\pi = 0$ ist. Der Cosinus bleibt im III Quadranten negativ, geht bei $\frac{3\pi}{2}$ durch Null und nimmt im IV Quadranten bis $+ 1$ zu. Es ist ersichtlich, daß die Werthe, sowohl des Sinus als auch des Cosinus sich bei jeder Drehung um eine ganze Peripherie $(= 2\pi)$ wiederholen, so daß also z. B.

$$sin\ n\ \pi = 0 \quad cos\ n\ \pi = \pm 1$$

ist, wenn wir unter n eine beliebige gerade oder ungerade ganze Zahl verstehen. Dagegen ist

$$sin\ n \frac{\pi}{2} = \pm 1 \qquad cos\ n \frac{\pi}{2} = 0,$$

wenn wir n nur ungerade Werthe beilegen.

Nach diesen Andeutungen werden die im Nachfolgenden vorkommenden, an die Gleichung (1) geknüpften Entwickelungen auch für weniger bewanderte Leser verständlich sein.

Wir behandeln hier zunächst nur die Aufgabe: die Bewegung eines Punktes (B) in einem gleichförmig elastischen Medium zu bestimmen, welcher von dem Erregungspunkte (A) um die Größe d entfernt ist.

Die Bewegung des ursprünglich erschütterten Punktes sei durch die Gleichung (1) bestimmt; diejenige des um d davon entfernten Theilchens beginne τ Secunden später und es seien seit Beginn derselben t' Secunden verflossen, so daß also

$$t' + \tau = t \text{ oder } t' = t - \tau.$$

ist. Bezeichnet man nun durch y' den Abstand des in B befindlichen Theilchens von seiner Gleichgewichtslage, so gilt für die Bewegung desselben die mit (1) analoge Gleichung

$$y' = \alpha\ sin\ 2\pi \frac{t'}{T} = \alpha\ sin\ 2\pi \cdot \frac{t-\tau}{T} \cdot \qquad 2.$$

Nun ist aber, wenn c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung bezeichnet

$$c \cdot \tau = d \text{ und } c \cdot T = l, \qquad 3.$$

wo l wie oben die Wellenlinie bedeutet; also auch

$$\frac{\tau}{T} = \frac{d}{l} \cdot \qquad 4.$$

Setzt man dieses in die obige Gleichung ein, so erhält man

$$y' = \alpha\ sin\ 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{l}\right) \qquad 5.$$

und durch diese Gleichung ist die Bewegung des Punktes B vollständig bestimmt, insofern man nach ihr den Werth von y' für jeden beliebigen Werth von d und t berechnen kann. Ist z. B. der Abstand der Theilchen A und B ein ganzes Vielfache einer Wellenlänge, also

$$d = n\,l, \qquad 6.$$

so ergibt sich

$$y' = \alpha \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - n \cdot 2\pi\right) \qquad 7.$$

oder auch, da der Werth des Sinus nach dem Obigen derselbe bleibt, wenn man dem zugehörigen Bogen eine oder mehrere Peripherien $(n \cdot 2\pi)$ hinzufügt:

$$y' = \alpha \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

Nun stimmt aber die Bewegungsgleichung für das Theilchen B mit der für A vollständig überein. Hiernach haben zwei um eine oder mehrere ganze Wellenlängen von einander entfernte Theilchen stets dieselbe Phase, gehen also zugleich und in denselben Sinen durch die Gleichgewichtslage, erreichen zugleich die äußersten Punkte ihrer Bahnen ꝛc. Setzen wir dagegen d gleich einer halben Wellenlänge oder gleich einer ungeraden Zahl halber Wellenlängen, so ergibt sich

$$y' = -\alpha \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

da sich der Werth des Sinus in seinen entgegengesetzten verwandelt, wenn man den Bogen um eine halbe Peripherie (π) vermehrt oder vermindert. Zwei von einander um eine ungerade Zahl halber Wellenlängen entfernte Theilchen haben daher stets entgegengesetzte Phase.

Um die hier durch Rechnung erhaltenen Resultate durch die Anschauung zu erkennen, denken wir uns, wie früher eins, jetzt zwei vollkommen gleiche Pendel hinter einander um eine Wellenlänge von einander entfernt an einem Eisenbahnwagen befestigt. Ertheilen wir gleichzeitig beiden nach derselben Seite hin gleich starke Stöße, so wird das zweite, sobald es an den Ausgangspunkt des ersten gekommen ist (was nach einer Schwingung jedes Pendels geschieht), mit seiner Spitze der von dem ersten Pendel gezogenen Curve folgen.

Sind dagegen die Pendel um eine halbe Wellenlänge (oder ein ungerades Vielfache derselben) von einander entfernt, und werden sie gleichzeitig nach derselben Seite hin in Schwingungen

versetzt, so liegen die Thäler der ersten Curve den Bergen der zweiten gegenüber; dieselben krümmen sich also nach entgegengesetzten Seiten.

9. Zusammensetzung der Schwingungscurven. — Von besonderer Wichtigkeit für das Verständniß gewisser akustischer Erscheinungen ist die Zusammensetzung der einfachen Sinuscurven zu anderen Curven, deren Berge und Thäler sich zwar ebenfalls periodisch wiederholen, aber nicht so einfache und regelmäßige Krümmungen zeigen wie die ersteren. Denkt man sich zwei Pendel, von denen das eine doppelt so schnelle Schwingungen macht als das andere, so hat die von dem ersten beschriebene Sinuscurve, welche wir mit A bezeichnen wollen, doppelt so lange Wellen als die andere, welche wir B nennen. Zeichnet man sich zwei solche Sinuscurven auf, die in demselben Punkte ihren Anfang nehmen und sich um dieselbe gerade Mittellinie hinschlängeln, und trägt die Abstände *(y)* der Curve B von dieser Mittellinie zu denen von A hinzu, oder zieht sie von ihnen ab, je nachdem die Punkte von B mit denen von A auf derselben oder entgegengesetzten Seite liegen, so entsteht offenbar eine neue periodisch gekrümmte Linie C, deren Wellenlänge mit derjenigen von A übereinstimmt. Man ersieht, daß die Berge derselben an den Stellen eine stärkere Ausbiegung zeigen, wo die Berge von A und B sich übereinander gelagert haben, während dort, wo eine Vereinigung von Berg und Thal stattgefunden hat, eine Einbiegung bemerklich ist.

Diese Zusammensetzung zweier Wellenlinien zu einer läßt sich sehr gut durch den Interferenzapparat von Eisenlohr veranschaulichen. Man denke sich eine Reihe ungleich langer Stäbchen (etwa Stricknadeln), welche in senkrechter Lage so neben einander gestellt sind, daß ihre oberen Enden die eine Sinuscurve (A) vorstellen, während die unteren in einer horizontalen geraden Linie liegen und (durch angelöthete Plättchen die auf einer horizontalen Leiste ruhen) verhindert sind, unter dieselbe herunter zu sinken. Man denke sich nun ein auf die hohe Kante gestelltes Brett, welches oben so ausgeschnitten ist, daß es die Form von B hat, von unten her gegen die Enden der Stricknadeln ge-

drückt, so nehmen offenbar die oberen Enden die Form der aus A und B zusammengesetzten Wellenlinie C an.

Es ist unschwer zu erkennen, daß, wie man auch das zu B gehörige Brett in horizontaler Richtung verschiebt, die Wellenlänge der durch Zusammensetzung von A und B entstehenden Curve dieselbe bleiben, dagegen die Form ihrer Berge und Thäler sich verändern wird, und daß dadurch eine große Mannigfaltigkeit von Formen hervorgebracht werden kann.

Auch wenn man mit A eine zweite Curve B^1 combinirt, deren Wellenlänge den dritten Theil derjenigen von A beträgt, wird die neu entstehende Linie C^1 eine Wellenlänge besitzen, welche mit der von A und C übereinstimmt, ja dieses wird auch noch stattfinden, wenn man A, B und B^1 zu einer Curve zusammensetzt; im Allgemeinen also stets und nur dann, wenn die mit A combinirten Sinuscurven eine solche Wellenlänge haben, welche zu denen von A im Verhältnisse ganzer Zahlen stehen.

Umgekehrt kann man jede periodische Curve, wie sich ganz allgemein beweisen läßt, in eine entsprechende Anzahl einfacher Sinuscurven zerlegen, und zwar nur auf eine Art. Es ist ersichtlich, daß die Zahl der letzteren im Allgemeinen um so größer sein wird, je schärfer und complicirter die Krümmungen der ersteren sind.

10. Interferenz der Wellen. — Das soeben über die Zusammensetzung der Schwingungscurven Gesagte läßt sich fast wörtlich auf die Zusammensetzung der Wellen übertragen, wie man am anschaulichsten an den Wasserwellen erkennt. Werden in zwei Punkten einer ruhenden Wasserfläche gleichzeitig Wellen erregt, so verbreitet sich jede derselben, ohne durch die andere gehindert zu werden, so als ob sie allein vorhanden wäre, d. h. die Wellenkreise schreiten auch nach dem Aufeinandertreffen mit der jedem derselben eigenen Geschwindigkeit vor und durchdringen sich gegenseitig. Die Bewegung jedes Wassertheilchens setzt sich nun aus den beiden ihm gleichzeitig von beiden Wellen mitgetheilten Bewegungen zusammen. Es entsteht also beim Zusammentreffen zweier Wellenberge ein höherer Berg, beim Zusammentreffen zweier Thäler ein tieferes Thal, während da, wo

ein Berg mit einem ebenso tiefen Thale zusammentrifft, die Wassertheilchen in ihrer ursprünglichen Lage bleiben. Durchschneiden sich zwei Wellenkreise senkrecht, so entstehen auf diese Art die gezackten Wellen, welche man so häufig, namentlich auf der See, beobachtet.

Die gegenseitige Einwirkung verschiedener Wellensysteme, vermöge welcher sie sich wechselseitig entweder verstärken oder schwächen, nennt man Interferenz.

Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei der Interferenz zweier Wellen von gleicher Länge (l), deren Erregungspunkte um eine Anzahl ganzer oder halber Wellenlängen von einander entfernt sind, namentlich wenn man annimmt, daß die Phasen beider an ihrem Ursprunge dieselben waren. Bezeichnen wir die Erregungspunkte durch A und B und setzen für den ersten Fall zunächst die Strecke AB bezw. gleich l, $2l$, $3l$ ꝛc., so findet offenbar in der Verlängerung von AB eine Verstärkung der Bewegung statt, so daß aus beiden Wellen eine neue mit höheren Bergen und tieferen Thälern hervorgeht. Ist dagegen $AB = \frac{l}{2}, 3 \cdot \frac{l}{2}, 5 \cdot \frac{l}{2}$ ꝛc., so schwächen die Wellen sich gegenseitig oder heben sich ganz auf.

Aehnliches gilt für die Seil-, Luft- und Aetherwellen.

Genaueres über die Interferenz werden wir bei Besprechung der stehenden Wellen geben.

11. Beugung der Wellen. — Treten Wasserwellen durch eine enge Oeffnung in einer senkrechten Wand, so gehen sie in der Mitte ungehindert weiter, an den seitlichen Rändern der Oeffnung dagegen erheben sie sich, so daß sie hier die Erregungspunkte von zwei neuen Wellensystemen bilden, welche sich nach allen Richtungen, also auch seitwärts von der Oeffnung verbreiten. Hierin besteht die Beugung der Wellen. Jedoch auch die Punkte der Oeffnung selbst bilden die Mittelpunkte neuer Wellen. Da die gebeugten Wellen sich bei ihrem Fortschreiten durchkreuzen, nach dem obigen also interferiren, so muß es in ihnen Punkte geben, in welchen die Höhe und Tiefe größer ist als in den ungehindert fortschreitenden Wellen.

Nicht nur beim Durchgange durch eine enge Oeffnung, sondern auch in dem gewissermaßen umgekehrten Falle, wenn eine breite Welle auf einen schmalen Gegenstand stößt, wie wenn z. B. Wasserwellen auf einen isolirt aus dem Wasser hervorragenden Fels oder Pfahl treffen, findet eine Beugung statt, indem jetzt die äußeren Ränder des hindernden Gegenstandes die Mittelpunkte neuer Wellen bilden, welche in den Raum hinter denselben eindringen und mit einander interferiren. Näheres hierüber an den betreffenden Stellen der Optik und Akustik.

12. Intensität der Schwingungen und Abnahme derselben mit der Entfernung. — Je stärker der einer schwingenden Masse z. B. einem Pendel ertheilte Stoß ist, desto größer ist seine Anfangsgeschwindigkeit und die Amplitude der Schwingungen. Nimmt man an, daß die Kraft, durch welche die Masse in ihre Gleichgewichtslage zurückgezogen wird, ihrer Entfernung von derselben proportional sei — und diese Voraussetzung kann man für die kleinen Schwingungen sowohl eines Pendels als auch der Theilchen eines gleichförmig elastischen Mediums als erfüllt ansehen —, so kann man, wie die theoretische Mechanik lehrt, auch die Amplitude der Anfangsgeschwindigkeit einfach proportional setzen. Die Intensität der bewegenden Kraft wird aber gemessen (vergl. pag. 119) durch das Product

$$\frac{m}{2} v^2$$

(wenn m die Masse, v die Anfangsgeschwindigkeit bezeichnen), ist also dem Quadrate der Geschwindigkeit, mithin nach dem Obigen auch dem Quadrate der Amplituden proportional.

In einem unbegrenzten gleichförmig elastischen Medium verbreitet sich nun ferner die in einem Punkte seines Innern erregte Bewegung nach allen Seiten hin mit gleicher Geschwindigkeit; dieselbe ist daher nach 1, 2, 3 2c. Schwingungen des ursprünglich erschütterten Theilchens bis zur Oberfläche von Kugeln vorgeschritten, deren Radien resp. gleich 1, 2, 3 2c. Wellenlängen sind. Da nun Kugelflächen sich wie die Quadrate der Radien verhalten, so vertheilt sich also die ursprüngliche Kraft in der

$n$fachen Entfernung auf eine n^2mal so große Fläche, ist also auf der Einheit der Fläche n^2mal so gering. In gleichförmig elastischen Medien ist also die Wirkung der Schwingungen dem Quadrate der Entfernung vom Erregungspunkte umgekehrt proportional.

13. Verhalten der Wellen beim Uebergange aus einem Medium in ein anderes. —

a. Reflection oder Zurückwerfung der Wellen. — In einem vollkommen gleichartigen elastischen Medium kann eine Welle niemals zurückkehren. Sowie bei einer Reihe gleicher elastischer Kugeln jede derselben, indem sie in centralem Stoße gegen die folgende trifft, dieser ihre ganze lebendige Kraft mittheilt, selbst aber zur Ruhe gelangt, muß auch in elastischen Medien der ursprüngliche Impuls stets weiter fortgepflanzt werden, da man sich dieselben aus Reihen von gleichen elastischen Massentheilchen zusammengesetzt denken kann.

Trifft dagegen eine Welle an die Grenze zweier verschiedenen Medien, so entstehen jedesmal aus ihr zwei neue Wellen, deren eine in dem neuen Medium vorschreitet, während die andere zurückläuft oder wie man sagt reflectirt wird. Das Verhalten dieser letzteren ist ein anderes, je nachdem die Dichtigkeit des zweiten Mediums eine geringere oder größere ist. Im ersteren Falle ist der Vorgang ähnlich dem, welcher stattfindet, wenn eine schwerere elastische Kugel gegen eine leichtere stößt. Die Bewegung der ersteren setzt sich fort, nur ihre Amplitude wird dadurch verringert, daß ein Theil der lebendigen Kraft auf die kleinere gestoßene Kugel übertragen wird. In analoger Weise werden beim Uebergange in ein dünneres Medium die an der Grenze liegenden Theilchen beider Medien in Bewegung gesetzt. In dem neuen Medium schreitet eine neue Welle mit einer diesem eigenthümlichen Geschwindigkeit fort, während zugleich die Grenztheilchen des ersten Mediums, welche fortfahren, sich in demselben Sinne zu bewegen, rücklaufende Wellen erregen, welche in diesem Falle nach dem Obigen als die Fortsetzungen der ankommenden zu betrachten sind, indem aus einem ankommenden Berge zunächst ein reflectirter Berg wird, also in der rücklau-

senden Welle ein Wellenberg einem Thale voranschreitet, wenn dieses in der ankommenden der Fall war. Selbstverständlich interferiren beide Wellen mit einander, und es ist klar, daß, wenn z. B. in der ursprünglichen Welle der Anfang des Thales an die Grenze gelangt, der voranschreitende Berg bereits reflectirt ist, so daß sich in diesem Augenblicke Berg und Thal aufheben; daß ferner eine Viertels-Undulation früher die reflectirte Hälfte des Berges sich über die noch nicht reflectirte lagert und einen halben Berg von doppelter Höhe bildet, während ebenso eine Viertels-Undulation nach dem Zusammentreffen des Berges und Thales an der Grenze sich ein halbes Thal von doppelter Tiefe befindet. Alles dieses erkennt man leicht, wenn man sich die Lage der auffallenden und reflectirten Wellen in den verschiedenen angedeuteten Phasen aufzeichnet.

Anders ist der Vorgang, wenn das zweite Mittel eine größere Dichtigkeit besitzt. Hier ist die reflectirte Welle der ankommenden in jeder Beziehung entgegengesetzt, indem aus einem Berge der letzteren ein Thal der ersteren, die Reihenfolge der Berge und Thäler in ihr also die umgekehrte wird. So wie eine leichtere elastische Kugel von einer schwereren zurückprallt, die Richtung ihrer Bewegung also in die entgegengesetzte verwandelt wird, ist dieses auch bei den Theilchen des dünneren Mediums der Fall, wie man zunächst leicht für die longitudionale Wellenbewegung erkennt. Aehnlich verhält es sich indessen auch bei den transversalen Wellen. Indem die Punkte des ersten Mediums von denen des zweiten dichteren stärker zurückgestoßen werden, als wenn sie dieselbe Dichtigkeit hätten, ist die Wirkung dieselbe, als ob die an der Grenze befindlichen Theilchen des ersten Mediums noch einen zweiten Impuls nach der entgegengesetzten Richtung erhalten hätten. Hieraus folgt unmittelbar, daß in diesem Falle die reflectirte Welle gegen die ankommende um eine halbe Wellenlänge verschoben erscheint.

Eine scheinbare Ausnahme von dem oben Gesagten bilden die Wasserwellen, indem dieselben von einer festen ebenen Wand so reflectirt werden, wie wir es oben für den Uebergang in ein dünneres elastisches Medium ausgeführt haben. Dieses hängt

mit der früher (pag. 181) erklärten Entstehung der Wasserwellen zusammen. Danach müssen, wenn ein Wellenberg an die Wand gelangt ist, die ihr angrenzenden Wassertheilchen gehoben, von diesen die Bewegung also in demselben Sinne rückwärts fortgepflanzt werden, wie sie, wenn die Wand nicht vorhanden wäre, vorschreiten würde. So entsteht also auch hier aus einem ankommenden Berge zunächst ein reflectirter Berg ꝛc.

Wegen der kreisförmigen Bewegung der ankommenden Welle gelangen nicht alle Punkte derselben gleichzeitig bei der Wand an. Fällt man sich von dem Mittelpunkte der ankommenden Welle ein Loth auf die reflectirende Ebene, so ist der Fußpunkt desselben als der Mittelpunkt einer reflectirten Welle zu betrachten, welche natürlich auch kreisförmig ist. Ebenso geht von jedem anderen Punkte der Wand eine solche reflectirte Kreiswelle aus, sobald das dort befindliche Wassertheilchen von der ankommenden Welle ergriffen und in Bewegung gesetzt ist. Die reflectirten Kreiswellen haben indessen einen um so kleineren Radius, je weiter re Mittelpunkte von dem erwähnten Fußpunkte seitwärts liegen und setzen sich (wie man sofort ersieht, wenn man einige der betreffenden Kreise zeichnet) zu einer neuen kreisförmigen Welle zusammen, welche in Bezug auf die reflectirende Ebene als das Spiegelbild der ankommenden betrachtet werden kann, und alle reflectirten Wellenkreise berührt (einhüllt). Der Mittelpunkt dieser reflectirten Welle liegt offenbar eben so weit hinter der reflectirenden Wand, wie derjenige der ankommenden Welle vor derselben. Zieht man von beiden Mittelpunkten je einen Radius (Strahl) nach demselben Punkte der reflectirenden Wand, so bilden dieselben mit der letzteren gleiche Winkel. Da der Radius auf der Berührungslinie des Kreises senkrecht (normal) ist, so kann man auch sagen: die Normalen der ankommenden und reflectirten Welle bilden mit der Reflectionsebene gleiche Winkel. Das hier für die kreisförmigen Wasserwellen Gesagte gilt mit den entsprechenden Modificationen ebenfalls für die kugelförmigen Luft- und Aetherwellen.

b. Brechung der Wellen. — Die in das angrenzende

Medium übertretende Welle, welche neben der reflectirten aus der ursprünglichen Welle entsteht, hat im Allgemeinen eine andere Fortpflanzungsgeschwindigkeit als diese, und zwar ist dieselbe der Größe $\sqrt{\frac{e}{d}}$ proportional, wenn man unter d die Dichtigkeit, unter e das Maß für die Elasticität des neuen Mediums versteht. Mit dieser Veränderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist nun zugleich eine Aenderung der Richtung, in welcher die Welle vorschreitet, verbunden. Wir nehmen an, daß in letzterem die Fortpflanzungsgeschwindigkeit geringer sei, daß es also entweder eine geringere Elasticität oder größere Dichtigkeit habe. Wie wir oben gesehen haben, besitzt die Wellenoberfläche in einem homogenen elastischen Medium eine kugelförmige Gestalt. Ist der Radius dieser Kugel hinreichend groß, so kann ein kleiner Theil derselben als Ebene betrachtet werden, und die zugehörigen Radien, durch welche die Richtung angegeben wird, in welcher sich der betreffende Theil der Wellenoberfläche fortpflanzt, als ein Loth auf derselben. Wir bezeichnen den senkrechten Durchschnitt eines solchen ebenen Theiles der Wellenfläche mit der Ebene der Zeichnung durch AB und nehmen an, daß der Punkt A an der Grenze der beiden Medien angelangt sei. Fällt die Grenzebene nicht gerade mit AB zusammen, so werden die zwischen A und B gelegenen Punkte der Welle beim weiteren Vorschreiten der letzteren successive an die Grenze gelangen, und jeder Punkt der letzteren ist nach dem früheren als Mittelpunkt einer neuen Kugelwelle zu betrachten, die sich in dem zweiten Medium mit der Geschwindigkeit v' verbreiten möge, während v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des ersten Mediums bezeichne. Ist der Punkt B der Wellenfläche nun ebenfalls in radialer Richtung bis zur Grenze vorgerückt, und bezeichnen wir den von ihm erreichten Punkt derselben durch C, so hat sich in der inzwischen verflossenen Zeit um A als Mittelpunkt im zweiten Medium eine neue kugelförmige Welle verbreitet, deren Radius wir durch AD bezeichnen wollen. Offenbar verhält sich

$$BC : AD = v : v' \qquad 1.$$

Ziehen wir nun von C an den um A beschriebenen Kreis (der

den Durchschnitt der Kugelwelle darstellt) eine Tangente *CD*, so berührt diese offenbar alle Wellen, welche sich um die zwischen *A* und *C* belegenen Punkte der Grenze gebildet haben, da diese im Verhältnisse ihrer Entfernung von *A* successive in Bewegung gesetzt wurden. *CD* stellt demnach die ebene Welle vor, welche aus der Vereinigung sämmtlicher Kugelwellen entstanden ist, deren Mittelpunkte sich zwischen *A* und *C* befinden.* Bezeichnen wir nun die Winkel, welche die beiden Wellen *AB* und *CD* mit der Grenzebene bilden resp. durch φ und ψ, so ist in den beiden rechtwinklichen Dreiecken *ACB* und *CAD*

$$\frac{BC}{AC} = \sin\varphi\ ;\ \frac{AD}{AC} = \sin\psi,$$

also

$$BC : AD = \sin\varphi : \sin\psi,$$

mithin nach Gleichung (1) auch

$$v : v' = \sin\varphi : \sin\psi.$$

Diese Gleichung drückt das bekannte Brechungsgesetz aus (vergl. Optik § 9), da die Winkel, welche die Wellenflächen mit der Grenzebene bilden, dieselben sind wie diejenigen, welche die Normalen der Wellenflächen mit dem Einfallslothe bilden. Aus der obigen Ableitung des Brechungsgesetzes folgt übrigens unmittelbar, daß beim Uebergange der Welle in das neue Medium die Richtung, in welcher dieselbe fortschreitet, sich um so mehr verändert, je größer die Veränderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist.

14. Von den stehenden Wellen. — Durch Interferenz der directen und der reflectirten Wellen bilden sich die sogenannten stehenden Wellen. Am einfachsten lassen sich dieselben vermittelst einer langen elastischen Schnur, z. B. eines Kautschuckschlauches darstellen. Befestigt man das eine Ende desselben an einer festen Wand und erregt an dem anderen durch

---

* Um sich diesen Vorgang zu versinnlichen, denke man an die Wellensysteme, welche sich bilden, wenn man einen Stab oder ein Seil mit dem einen Ende geneigt in das Wasser senkt. Auch hier werden die successive entstehenden Wellenkreise sich zu gradlinigen Wellen zusammensetzen.

passende periodische Bewegungen der Hand eine Reihe von Wellen, so wird jede derselben, nachdem sie die Schnur entlang laufend an dem befestigten Ende angelangt ist, reflectirt und zwar nach dem Obigen so, daß dem ankommenden Berge ein reflectirtes Thal entspricht. Indem nun die reflectirten Wellen sich an einigen Stellen mit den ursprünglichen aufheben, an anderen verstärken, theilt sich die ganze Schnur in eine Anzahl von Abschnitten, deren jede so schwingt als bildete sie ein Ganzes für sich; diese sind durch Ruhepunkte (Knotenpunkte) von einander geschieden. Die letzteren bilden sich an denjenigen Stellen, wo gleichzeitig zwei entgegengesetzte nahezu gleich starke Bewegungen auftreten. In der Mitte zwischen je zwei Knotenpunkten liegen die Stellen stärkster Schwingung, welche man Schwingungsbäuche nennt. Während alle zu derselben Abtheilung gehörigen Theilchen gleichzeitig sich nach derselben Richtung hin bewegen und sich stets in derselben Phase befinden, ist diese bei den Theilchen zweier an einander grenzenden Abtheilungen die entgegengesetzte. Die Entfernung zweier aufeinander folgenden Knotenpunkte beträgt eine halbe Wellenlänge. Um dieses, sowie den ganzen Vorgang bei der Bildung stehender Wellen noch näher zu erläutern, nehmen wir an, daß die Zeit, während welcher ein Impuls von der bewegenden Hand bis zum Ende der Schnur läuft, gerade eine Secunde betrage. Derselbe wird demnach nach einer halben Secunde bis zur Mitte der Schnur vorgeschritten sein und letztere also in ihrer ersten Hälfte eine Ausbiegung (halbe Welle) zeigen, welche in der zweiten Hälfte der Secunde gerade bis zum befestigten Ende vorgeschritten ist. In dem Augenblicke, wo hier die Reflection der Welle beginnt, werde ein dem ersten gleicher zweiter Impuls durch die Hand ertheilt, so ist klar, daß der Anfang des reflectirten Thales gleichzeitig mit dem des direct entstandenen Berges in der Mitte des Seiles eintrifft. Da diese Stelle nun nach entgegengesetzter Richtung mit gleicher Kraft gezogen wird, so bleibt sie in Ruhe; es entsteht also in ihr ein Knotenpunkt.

Dauert jeder Impuls nur eine Drittel-Secunde, und wird der zweite wiederum in dem Augenblicke ertheilt, wo die Reflection

des ersten beginnt, so entstehen zwei Knotenpunkte und die ganze Schnur theilt sich in drei Abschnitte mit je einem Schwingungsbauche.

In ähnlicher Weise, wie bei einer elastischen Schnur lassen sich auf der Oberfläche einer Flüssigkeit stehende Wellen hervorrufen und zur Anschauung bringen. Man denke sich in einer Wellenrinne (rechteckiger Trog mit Glaswänden) durch periodische Bewegungen eines am Ende derselben eingetauchten Brettchens zwei Wellen erregt. Die Länge einer solchen sei gerade gleich derjenigen der Wellenrinne. Man überzeugt sich dann leicht, wenn man sich die Gestalten der directen und reflectirten Welle für die verschiedenen Phasen unter einander aufzeichnet, und zwar etwa für die Zeiten von resp. 1, 2, $2\frac{1}{4}$, $2\frac{1}{2}$, $2\frac{3}{4}$, 3 ꝛc. Schwingungen, daß z. B. zu den Zeitmomenten nach $2\frac{1}{4}$ und $3\frac{1}{4}$ Schwingungen dieselben Wellenformen wiederkehren.

Aehnlich bilden sich mehrere stehende Wellen, wenn die Länge der Welle ein bestimmter Bruchtheil von derjenigen des Gefäßes ist.

15. Mathematische Betrachtungen. Allgemeiner und schärfer als es durch die bisherigen Betrachtungen geschehen ist, welche auf bloßer Anschauung basirten, läßt sich die Untersuchung über die Zahl und Länge der Knotenpunkte mit Hülfe der Mathematik führen, wie wir in Kürze andeuten wollen. Wir gehen dabei von der bereits früher benutzten Gleichung 1, pag. 187 aus. Wir nehmen wiederum zwei Punkte A und B eines gleichförmig elastischen Mediums z. B. des Lichtäthers als die Erregungspunkte von Wellen an. Wir bezeichnen die Entfernung AB durch a und untersuchen nun die Bewegung eines dritten Punktes C auf der Verbindungslinie AB, der zugleich von den beiden einander entgegenlaufenden Wellen ergriffen wird. Der Einfachheit wegen nehmen wir an, daß die Amplituden der beiden Wellen ursprünglich einander gleich seien und jede den Werth 2α habe; außerdem mögen die Punkte ihre Bewegung gleichzeitig beginnen und dieselbe Schwingungsdauer, die von ihnen erregten Wellen also auch dieselbe Länge haben. Wir setzen

$$AC = x \text{ also } AB = a - x.$$

Nach dem Früheren (vergl. pag. 189) würde die Bewegung des Punktes C, wenn er nur durch je eine der beiden von A und B ausgehenden Wellen getroffen würde, durch eine der folgenden Gleichungen bestimmt sein

$$y = \alpha \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{l}\right)$$

$$y' = \alpha \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a - x}{l}\right)$$

worin die Buchstaben y, t, T, l die früher angegebene Bedeutung haben. Bezeichnen wir nun durch Y die Entfernung des Punktes C von seiner Gleichgewichtslage, welche er zu einer beliebigen Zeit t unter der gleichzeitigen Einwirkung beider Wellen besitzt, so ist offenbar

$$Y = y + y'.$$

Setzt man in diese Gleichung die obigen Werthe von y und y' ein, so ergibt sich nach einigen leichten Umformungen, welche jeder mit der Trigonometrie vertraute Leser selbst ausführen kann

$$Y = 2\,\alpha \cos\left(\frac{2\,x - a}{l} \cdot \pi\right) \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a}{2\,l}\right)$$

oder wenn man hier zur Abkürzung

$$2\,\alpha \cos\left(\frac{2\,x - a}{l} \cdot \pi\right) = X$$

setzt, auch

$$Y = X \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{a}{2\,l}\right).$$

Da die Größe X die Zeit t nicht enthält, die Veränderlichkeit von Y in dieser Beziehung also nur von dem zweiten Factor abhängt, so erkennt man sofort, daß die vorstehende Gleichung der oben für y und y' aufgestellten ähnlich ist. Es wird also jeder beliebige Punkt der Linie AB eine ähnliche periodische Bewegung machen, als ob nur eine erregende Welle vorhanden wäre und zwar ist offenbar die Schwingungsdauer (T) unverändert geblieben und dieselbe für alle Punkte, welches auch der Werth von x sei. Die Amplitude der Schwingungen, welche in der früheren Gleichung durch den Factor α, in der jetzigen durch X bestimmt ist, ändert sich allerdings mit dem Werthe von x,

also mit der Lage des Punktes C. Nimmt man der einfacheren Betrachtung wegen an, daß α ein ganzes Vielfache einer Wellenlänge, also $= n\, l$ sei, so verwandelt sich die Gleichung für Y nach einigen leichten Rechnungen in folgende einfachere:

$$Y = 2\, \alpha \cos \frac{2\, x}{l}\, \pi \sin 2\, \pi\, \frac{t}{T}.$$

Um nun die Knotenpunkte zu finden, braucht man nur die Werthe von x zu bestimmen, für welche

$$\cos \frac{2\, a}{l}\, \pi = 0$$

wird, da für diese auch $Y = 0$ ist, welchen Werth auch t haben möge. Der $\cos$ wird aber gleich Null, wenn der zugehörige Winkel ein ungerades Vielfache eines Viertel-Kreises $\left(= \frac{\pi}{2}\right)$ ist, also wenn

$$\frac{2\, x}{l}\, \pi = (2\, n + 1) \cdot \frac{\pi}{2} \text{ oder } x = (2\, n + 1)\, \frac{l}{4}$$

ist, da $2\, n + 1$ die Reihe der ungeraden Zahlen ausdrückt, wenn man sucessive $n = 1, 2, 3,$ ꝛc. setzt. Die entsprechenden Werthe von x, durch welche die Lage der Knotenpunkte bestimmt wird, sind demnach

$$\frac{l}{4},\quad 3\, \frac{l}{4},\quad 5\, \frac{l}{4},\quad 7\, \frac{l}{4} \text{ ꝛc.} \cdots$$

dieselben folgen also, wie wir es auch früher aus der Anschauung erkannten, in regelmäßigen Abständen von je einer halben Wellenlänge aufeinander. Da $\cos \frac{2\, x}{l}\, \pi$ beim Durchgange durch Null sein Zeichen wechselt, so ist die Bewegung in zwei durch einen Knotenpunkt von einander geschiedenen Abtheilungen stets entgegengesetzt. Für die gerade in der Mitte zwischen zwei Knotenpunkten liegenden Punkte, für welche also resp.

$$x = \frac{l}{2},\quad 2\, \frac{l}{2},\quad 3\, \frac{l}{2}, \cdots n\, \frac{l}{2}$$

ist, ergibt sich aus der obigen allgemeinen Gleichung

$$Y = 2\, \alpha \cos n\, \pi \sin 2\, \pi\, \frac{t}{T}\, .$$

$\cos n\pi$ ist aber entweder gleich $+1$ oder gleich -1, je nachdem n eine gerade oder ungerade Zahl ist. Man hat also, wenn man die zu zwei aufeinander folgenden Punkten gehörigen Werthe von Y durch Y' und Y'' bezeichnet

$$Y' = 2\,\alpha \sin 2\,\pi \frac{t}{T}; \quad Y'' = -\,2\,\alpha \sin 2\,\pi \frac{t}{T},$$

wodurch man das über die entgegengesetzte Richtung der Bewegung in zwei aufeinander folgenden stehenden Wellen Gesagte bestätigt findet. Zur Zeit

$$t = \frac{T}{4}$$

ist z. B.

$$Y = +\,2\,\alpha \quad Y'' = -\,2\,\alpha\ ,$$

es haben dann also die betrachteten Punkte ihre Maximal-Entfernungen von der Gleichgewichtslage. Leicht ersieht man auch aus der obigen allgemeinen Gleichung für Y, daß alle zu derselben stehenden Welle gehörigen Punkte gleichzeitig nach derselben Richtung schwingen, da $\cos \frac{2\,x}{l}\,\pi$ für die Werthe von x sein Zeichen nicht verändert, welche zu Punkten gehören, die zwischen zwei benachbarten Knotenpunkten liegen. Dagegen nimmt die Amplitude der aufeinander folgenden einzelnen Punkte bis zum Maximalwerthe $2\,\alpha$ allmälig zu und wieder ab, da $\cos \frac{2\,x}{l}\,\pi$ für dasselbe Intervall von 0 bis 1 wächst und wieder zu Null abnimmt.

So erhalten wir durch die Rechnung ein ähnliches nur genaueres Bild für die Bewegung einer Reihe von Theilchen, welche durch elastische Kräfte verbunden sind, wie wir es früher in seinen Hauptzügen, von der Anschauung ausgehend, entwerfen konnten. Die Gleichung (1) welche wir unserer Betrachtung zu Grunde legten, findet übrigens noch viel weiter gehende Anwendungen. Nach derselben kann man u. A. auch die Bahn eines Theilchens bestimmen, welches von zwei nicht gleichgerichteten Wellenbewegungen von derselben Wellenlänge ergriffen wird. In diesem Falle ist im Allgemeinen die Bahn der Theilchen eine

Ellipse, wie man auch leicht durch die Anschauung erkennt z. B. mit Hülfe einer Bleikugel, welche an einem Faden hängt. Ertheilt man derselben zunächst einen Impuls in einer beliebigen Richtung und darauf, während sie schwingt, einen zweiten Impuls in einer gegen die erste beliebig geneigten Richtung, so bewegt sich die Kugel in einer elliptischen Bahn. Die Form der letzteren wird offenbar von dem Verhältnisse der Stärke der beiden Impulse und dem Winkel, welchen sie mit einander bilden, abhängen. In speciellen Fällen verwandelt sich die Ellipse in einen Kreis oder eine gerade Linie.

Für mathematisch gebildete Leser fügen wir noch hinzu, daß man die Gleichung der Bahn allgemein durch Elimination von t aus den beiden Gleichungen

$$y = \alpha \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{l}\right), \text{ und}$$

$$z = \beta \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x-a}{l}\right)$$

bestimmt, wobei angenommen wird, daß y und z nicht in derselben Ebene liegen.

Die leichte Rechnung ergibt schließlich:

$$\left(\frac{y}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{z}{\beta}\right)^2 - 2\frac{y}{\alpha}\cdot\frac{z}{\beta}\cos 2\pi\frac{a}{l} = \sin^2 2\pi\frac{a}{l}$$

Ist nun z. B. a (nach dem Früheren die gegenseitige Entfernung der beiden Erregungspunkte) $= 2n\cdot\frac{l}{2}$, so wird

$$\cos 2\pi\frac{a}{l} = 1 \quad \sin 2\pi\frac{a}{l} = 0$$

mithin die obige Gleichung

$$\frac{y^2}{\alpha^2} - 2\frac{y}{\alpha}\cdot\frac{z}{\beta} + \frac{z^2}{\beta^2} = 0$$

woraus folgt

$$\frac{y}{\alpha} - \frac{z}{\beta} = 0 \qquad \text{oder:} \qquad \frac{y}{z} = \frac{\alpha}{\beta}$$

In diesem Falle verwandelt sich demnach die Ellipse in eine gerade Linie.

Ist ferner

$$a = \frac{l}{4} \text{ und } \alpha = \beta$$

und sind die Bewegungsrichtungen (y und z) aufeinander senkrecht, so wird die obige Gleichung

$$y^2 + z^2 = \alpha^2$$

welche für eine Kreisbahn gilt, deren Radius $= \alpha$ ist.

Die Lehre von den stehenden Wellen findet besonders Anwendung bei den tönenden Schwingungen der Saiten, Stäbe, Platten und Luftsäulen, bei deren Besprechung wir uns auf die im Vorhergehenden enthaltenen Entwickelungen beziehen werden.

Zweites Kapitel.

Vom Schalle.

1. Einleitung: Allgemeine Bemerkungen über Sinneswahrnehmungen. — Obgleich die Lehre von den Sinnesthätigkeiten und den aus ihnen hervorgehenden Sinneswahrnehmungen eigentlich den Gebieten der Physiologie und Psychologie angehört, so ist doch die Kenntniß einiger darauf bezüglicher allgemeiner Gesetze auch für das Verständniß gewisser physikalischer Erscheinungen von Wichtigkeit, welche, wie die des Schalles, des Lichtes und der Wärme nur durch Vermittlung je eines Sinnesorganes, nämlich bezw. des Ohres, Auges und der Haut wahrgenommen werden. Wir schalten daher eine kurze Erläuterung darüber an dieser Stelle ein.

Damit irgend eine Sinneswahrnehmung zu Stande komme, muß auf einen der Nerven, welche vom Gehirn ausgehen und sich in den verschiedenen Sinneswerkzeugen verbreiten, ein Reiz ausgeübt werden. Dieser wird zum Gehirn fortgeleitet und äußert sich dort zunächst als Empfindung. Wird der Nerv durchschnitten und damit die Leitung aufgehoben, so hört die Empfindung

auf. Der Sitz des Schmerzes, welchen wir z. B. bei einer Verletzung empfinden, ist also nicht an der Stelle, wo die Verletzung stattfand, sondern im Gehirn zu suchen. So erklärt sich u. A. auch die bekannte Thatsache, daß Personen, denen ein Glied amputirt ist, noch lange Zeit nach der Operation das Gefühl haben, als wären sie in dem Besitze desselben, ja sogar darin Jucken oder Schmerz zu empfinden glauben, während in Wirklichkeit doch nur der auf das Ende des durchschnittenen Nervs ausgeübte Reiz im Gehirn ähnliche Empfindungen hervorrief, wie sie die betreffende Person in unversehrtem Zustande gehabt hatte.

Dergleichen Täuschungen, welche stets eintreten, wenn ein Nerv auf ungewöhnliche Art gereizt wird, sind noch in anderer Beziehung sehr lehrreich. Sie zeigen nämlich, daß die Vorstellungen äußerer Objecte nicht unmittelbar, sondern erst durch Deutung der Empfindungen, also durch eine psychische Thätigkeit gewonnen werden. Es gilt für den als Beispiel gewählten, sowie für alle ähnlichen Fälle in dieser Beziehung das allgemeine Gesetz, daß wir eine Empfindung stets so deuten, wie wir es unter normalen Verhältnissen zu thun gewöhnt sind. Wir werden zu diesem Gesetze, welches den Schlüssel zur Erklärung einer großen Zahl von Erscheinungen bietet, in der Optik und Akustik sehr lehrreiche Belege kennen lernen, beschränken uns daher an dieser Stelle darauf, zur Erläuterung desselben noch auf ein bekanntes Phänomen hinzuweisen. Wenn man den Zeigefinger und Mittelfinger derselben Hand so über einander legt, daß ihre Spitzen sich kreuzen, und nun mit beiden zugleich auf einen zwischen dieselben gebrachten Gegenstand z. B. eine auf dem Tische liegende Erbse drückt, so scheint dieser doppelt vorhanden zu sein. Unter normalen Verhältnissen d. h. bei der natürlichen Lage der beiden Finger, können nämlich dieselben Stellen der letzteren, welche hier von einem Kügelchen berührt wurden, nur von zwei getrennten Kügelchen berührt werden. Es liegt also hier wie in allen ähnlichen Fällen gewissermaßen eine Täuschung des Urtheiles vor, welche auf einem falschen

Schlusse beruht, sich uns indessen mit zwingender Nothwendigkeit aufdrängt.

Die weitgreifende Bedeutung des obigen Gesetzes hat sich namentlich auch bei den Untersuchungen über die von den einzelnen Sinnesorganen vermittelten Wahrnehmungen gezeigt. Durch die neuere Physiologie ist festgestellt, daß durch jedes Sinneswerkzeug nur ganz bestimmte Arten von Empfindungen hervorgerufen werden können, wie verschieden auch die auf den betreffenden Empfindungsnerv wirkenden Reizmittel sein mögen. Ob also der Augennerv durch einen electrischen Strom, durch Druck auf den Augapfel, durch Blutandrang, durch eine Verletzung oder sonst irgend wie gereizt wird, immer entsteht eine Lichtempfindung. Ebenso entstehen durch irgend eine Reizung des Ohrennervs Schallempfindungen, durch Reizung der Hautnerven Wärme- oder Druckempfindungen u. s. w. Nun gibt es für jeden Sinnesnerv ein Reizmittel, durch welches er gewöhnlich erregt wird. Dieses besteht für den Augennerv z. B. in Aethervibrationen, für den Gehörnerv in Luftschwingungen. Wir halten daher gemäß dem obigen Gesetze jede durch Reizung des Augennervs hervorgerufene Empfindung für ein Zeichen dafür, daß Licht in unserem Gesichtsfelde (objectiv) vorhanden sei, eben so wie wir das Klingen in den Ohren, welches nur eine subjective Erscheinung, hervorgerufen durch abnorme Reizung des Gehörnervs ist, für ein Zeichen des Vorhandenseins eines Schalles in dem Gehörfelde halten u. dgl. m.

2. Von den Schallempfindungen. — Wenngleich die Schallempfindungen nach dem Obigen dem Ohre durchaus eigenthümlich und von den durch die übrigen Sinneswerkzeuge erregten so verschieden sind, daß sie in qualitativer Beziehung gar nicht mit ihnen verglichen werden können, so zeigen sie doch unter sich Verschiedenheiten, die sich in ihrer sprachlichen Bezeichnung wiederspiegeln, wonach man sie Knall oder Puff, Geräusch, Klang oder Ton nennt. Alle diese Schallempfindungen werden gewöhnlich durch Erschütterungen der Luft, welche sich zu unserem Ohre fortpflanzen, hervorgerufen. Die erste

derselben und zugleich die einfachste, welche durch plötzliches Entstehen und kurze Dauer charakterisirt ist und je nach ihrer größeren oder geringeren Stärke die eine oder andere Bezeichnung erhält, wird hervorgebracht durch eine einfache Luftwelle, wie sie entsteht, wenn die Dichtigkeit der Luft an irgend einer Stelle eine plötzliche Veränderung erleidet. Dieses ist z. B. der Fall, wenn man einen mit Knallgas, einer Mischung aus 1 Raumtheil Sauerstoff und 2 Raumtheilen Wasserstoff, gefüllten Ballon explodiren läßt. Durch die bei der chemischen Verbindung beider Gase hervorgebrachte Hitze wird die umgebende Luft plötzlich gewaltsam nach allen Seiten hin fortgestoßen, die Bewegung theilt sich — wie pag. 184 erläutert ist — schnell immer entfernteren Lufttheilchen mit, während die ursprünglich erschütterte Luft zur Ruhe gelangt. Ein ähnlicher Vorgang findet beim Ueberspringen eines Blitzes, beim Abfeuern eines Schießgewehres, beim Zusammenschlagen zweier Körper und in vielen anderen Fällen statt. Derartig starke Lufterschütterungen, wie die genannten, sind sogar durch das bloße Hautgefühl oder an der Bewegung leicht beweglicher Körper bemerkbar. So bringt ein heftiger Donnerschlag oder eine Kanonade ein Klirren der Fensterscheiben in der Nähe hervor, welche zuweilen sogar zerbrochen oder bei stärkeren Explosionen, wenn sie sich in Bleirahmen befinden, eingebogen werden. Als Biot eine Pistole in eine 3000 Fuß lange Röhre der pariser Wasserleitung abschoß, wurden am anderen Ende derselben leichte Körperchen bis auf zwei Fuß fortgeschleudert und ein brennendes Licht ausgelöscht. Dasselbe kann man erweisen, wenn man vor einer ca. anderthalb Meter langen und ein Decimeter weiten Röhre, welche am Ende trichterförmig zuläuft, zwei Bücher kräftig zusammenschlägt. Da die Wirkung sich bei kürzeren Röhren fast augenblicklich zeigt, so geht daraus hervor, daß man es dabei nicht mit einer Strömung, sondern mit einer Wellenbewegung zu thun hat.

Ist die Mündung der Röhre bei dem letztgenannten Versuche mit einem dünnen Häutchen von Collodium oder Kautschuck überspannt, an welchem ein leichtes Pendelkügelchen hängt, so wird dieses fortgeschleudert, sobald das Häutchen von der Luft-

welle getroffen wird. Ein ähnlicher Vorgang findet in unserem Ohre statt. Vorbehaltlich einer genauen Beschreibung desselben sei hier nur erwähnt, daß am Ende des röhrenförmigen Gehörganges, welcher aus der Ohrmuschel in das Innere des Kopfes führt, eine dünne kreisförmige Membran, das Trommelfell ausgespannt ist, welche durch jede von Außen kommende Luftwelle erschüttert wird. Durch eine Kette kleiner sehr beweglicher Knöchelchen (Hammer, Amboß, Erbsenbein und Steigbügel) wird diese Erschütterung auf die inneren Theile des Ohres und die in demselben ausgebreiteten Fasern des Gehörnervs übertragen, durch dessen Erregung nach dem Obigen die Schallempfindung entsteht.

Schießt man eine Pistole auf dem Gipfel hoher Berge ab, wo die Luft bereits stark verdünnt ist, so entsteht ein viel schwächerer Knall, nur etwa wie der Puff eines Schwärmers oder einer explodirenden Selterwasserflasche. Um so auffallender ist es, daß die Explosionen von Meteoren, welche gewöhnlich in sehr großer Höhe vor sich gehen, auf der Erde noch so stark hörbar sind. Es läßt sich daraus ein Rückschluß auf die Gewalt derselben ziehen.

Im luftleeren Raume entsteht kein Schall. Um dieses zu zeigen, hängt man an einem dünnen Faden ein Glöckchen in einer Glaskugel auf, welche sich auf die Luftpumpe aufschrauben läßt und mit einem Hahne versehen ist. Evacuirt man dieselbe, schließt dann den Hahn ab und schwingt sie, nachdem man sie abgeschraubt hat, hin und her, so daß der Klöpfel gegen die Glocke schlägt, so hört man nichts, während ein immer lauter werdendes Klingen wahrzunehmen ist, wenn man die Luft langsam einströmen läßt.

3. Fortpflanzungs-Geschwindigkeit des Schalles. Daß der Schall sich nicht in unmeßbar kurzer Zeit durch die Luft verbreitet, kann man bemerken, wenn man z. B. einen Holzschläger beobachtet, welcher sich in einer Entfernung von einigen hundert Schritten befindet. Man hört den Schlag seiner Axt erst einge Zeit nachdem man sie niederfallen gesehen hat. Eine ähnliche Beobachtung läßt sich an den Rauchstößen lang-

sam fahrender Locomotiven machen. Auch die Erscheinung, daß der Donner immer später gehört als der Blitz gesehen wird, zeigt, daß der Schall sich langsamer als das Licht durch die Luft verbreitet.

Denkt man sich eine Person, welche in gleichmäßigen Zwischenräumen von z. B. genau einer Secunde Schläge mit einem Hammer ausführt und entfernt man sich so weit, bis man den Hammer in demselben Augenblicke niederfallen sieht, in welchem man den Schlag hört, so gibt die Entfernung, in welcher man sich befindet, die Geschwindigkeit des Schalles, d. h. den in einer Secunde von ihm durchlaufenen Weg an. Derselbe beträgt in der freien Luft für Null Grad ca. 331 Meter oder 1020 pariser Fuß. Die neuesten und genauesten Untersuchungen hierüber sind von V. Regnault in der Ebene von Satory bei Paris angestellt worden. Es wurden dort einige hinreichend große Entfernungen möglichst genau abgemessen, und sowohl der Zeitmoment der Entstehung des Schalles am Ausgangspunkte als auch derjenige der Ankunft am Endpunkte der abgemessenen Strecke durch die Schallwelle selbst registrirt, wodurch die Genauigkeit der Messungen gegenüber den früheren Beobachtungen, bei welchen man die Zeit an Uhren ablas, erheblich gesteigert wurde. Der Hauptsache nach war die von Regnault getroffene Einrichtung folgende: Es waren an beiden Stationen zwei gespannte Membranen aufgestellt, an deren jeder ein leichtes Pendelchen hing, welches bei jeder Erschütterung der Membran fortgeschleudert wurde und einen electrischen Strom unterbrach. Dadurch wurde zugleich auf einer berußten Walze je ein Punkt markirt. Auf derselben Walze wurden die Secundenpunkte durch eine electrische Pendeluhr und die Hundertstel Secunden durch eine beständig vibrirende Stimmgabel (vergl. weiter unten § 10 und 13) mit einer biegsamen Spitze (Borste) in den Rußüberzug eingezeichnet. Man konnte so die Zeit, welche der Fortbewegung des Schalles zwischen beiden Stationen entsprach, bis auf Hundertstel Secunden genau ermitteln. Auf diese Weise fand sich, daß die Schallgeschwindigkeit wie die der Wasserwellen (vergl. pag. 180) mit der Entfernung abnimmt, was durch

die früheren, weniger genauen Beobachtungen nicht hatte festgestellt werden können. Es fand sich nämlich die Geschwindigkeit für trockene und ruhige Luft bei Null Grad gleich 331,37 Meter, (1020,1 pariser Fuß) wenn die Entfernung beider Stationen 4000 Fuß betrug, dagegen nur 330,70 Meter oder 1018,9 Fuß, wenn dieselbe auf 7500 Fuß stieg. Ein ähnliches Resultat gaben Beobachtungen an Röhren. Bei diesen wurden die Mündungen durch Membranen verschlossen, so daß man nicht nur den directen Schall beobachten, sondern denselben auch noch durch eine Reihe von Reflectionen zwischen den Enden verfolgen konnte. Hierbei zeigte sich, daß sich die Schallwellen viel weiter fortpflanzen, als man sie durch das Ohr wahrnimmt. Bei einer Röhrenleitung von 4 Zoll Durchmesser, war die hörbare Tragweite des Schalles, welcher durch Abfeuerung einer Pistole hervorgerufen wurde, die mit 1 Gramm Pulver geladen war, 3540 pariser Fuß, während die stille Tragweite bis zu 12500 Fuß beobachtet wurde. Bei einer anderen Röhrenleitung von 40 Zoll Weite und über 15000 Fuß Länge und einer Pulverladung von 2,4 Gramm, stieg die stille Tragweite, soweit man sie durch wiederholte Reflectionen an den Membranen verfolgen konnte sogar bis auf 300000 Fuß oder über 13 Meilen.*)

4. **Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nimmt mit der Temperatur zu.** Durch die Hinzufügung der Temperatur bei der obigen Angabe der Schallgeschwindigkeit haben wir schon angedeutet, daß dieselbe sich mit der Temperatur verändert. Die Beobachtungen lehren in Uebereinstimmung mit der von Laplace gegebenen Theorie, daß sie für jeden Grad der

---

* Es ist dieses Resultat, wonach also Membranen gegen die Erschütterungen durch Schallwellen empfindlicher als das Ohr sind, um so auffallender, als die Empfindlichkeit des Ohres, nach den sinnreichen und feinen Untersuchungen von Töpler und Boltzmann (Pogg. Annalen 1870, pag. 351) so groß ist, daß es noch Töne wahrnimmt, bei denen die Schwingungsweite eines Lufttheilchens an der Grenze der Hörbarkeit nur noch 0,00004 Millimeter oder etwa ein Zehntel von der Wellenlänge des grünen Lichtes ist, so daß das Ohr mit dem Auge an Empfindlichkeit rivalisiren kann. (Vergl. Radau, Lehre vom Schall, pag. 108.)

Centesimalscala um etwa 2 Fuß zunimmt. Bezeichnet man durch c_0 die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bei 0^0 so ist sie bei t^0

$$c = c_0 \sqrt{1 + 0{,}003665 \cdot t}.$$

Es sei beiläufig bemerkt, daß man von dieser Formel eine nützliche Anwendung zur Bestimmung hoher Temperaturen gemacht hat. Es ist nämlich ersichtlich, daß man aus ihr t berechnen kann, sobald die Werthe von c_0 und c bekannt sind. Den Werth von c_0 haben wir oben angegeben, c läßt sich aber recht genau auf directem Wege (durch Messung der Wellenlänge von Tönen, deren Höhe bekannt ist) bestimmen.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle in einem elastischen Medium hängt wie wir schon früher erwähnt haben (vergl. Wellenlehre §. 3) im Allgemeinen von dem Verhältniß der Elasticität e zur Dichtigkeit d des Mittels ab, in welchem der Schall sich fortpflanzt, und zwar ist dieselbe der Größe $\sqrt{\frac{e}{d}}$ proportional. Sie wird demnach größer wenn die Elasticität bei unveränderter Dichtigkeit zunimmt; und um so kleiner, je größer die Dichtigkeit bei unveränderter Elasticität wird. Daher ist auch bei derselben Elasticität die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Kohlensäure kleiner, im Wasserstoff größer als in der Luft. Daß große Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit sehr geringer Dichtigkeit bestehen kann lehrt auch der Lichtäther, in welchem das Licht sich bekanntlich 40000 Meilen in der Secunde fortpflanzt.

Da nach dem Mariotte'schen Gesetze bei unveränderter Temperatur der Quotient $\frac{e}{d}$ für alle Gase nahezu constant ist, so könnte die Geschwindigkeit durch bloße Druckveränderung ohne gleichzeitige Temperaturveränderung nicht wachsen. Berechnet man, wie es Newton that, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nach der Formel

$$c = \sqrt{\frac{e}{d}}$$

ohne Rücksicht auf die Veränderungen der Elasticität, welche durch die Temperaturveränderungen hervorgebracht werden, die bei der

abwechselnden Verdichtung und Verdünnung der Luft in Wellenbewegung versetzten Luft entstehen, so ergibt sich für den Werth 916 engl. Fuß oder 279 Meter, welcher etwa um ein Sechstel kleiner ist als der oben angegebene, welcher direct durch Beobachtung gefunden ist. Laplace zeigte, daß man das Verhältniß $\frac{e}{d}$ noch durch das der beiden specifischen Wärmen der Luft bei constantem Druck und constantem Volumen zu multipliciren hat, um zu einer mit der Erfahrung übereinstimmenden Formel zu gelangen. Das erwähnte Verhältniß hat für atmosphärische Luft den Werth 1,42. Zieht man hieraus die Wurzel, so erhält man nahezu 1,19 und wenn man hiermit die oben angegebene Zahl Newton's multiplicirt, so erhält man 331^m, was mit der Erfahrung übereinstimmt. Uebrigens ist nicht zu übersehen, daß sich durch die abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der in Schallschwingungen versetzten Luft die Temperatur derselben als Ganzes nicht wesentlich verändert, daß daher die Vergrößerung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles aus diesem Grunde auch nicht merklich sein würde, wenn die zwischen zwei aneinander grenzenden Schichten verdünnter und verdichteter Luft gebildeten Temperaturunterschiede sich etwa durch Strahlung augenblicklich ausgleichen könnten. In Röhren mit gut strahlenden Wänden wird diese Ausgleichung durch den Einfluß der letzteren beschleunigt und daraus erklärt sich nach Kundt die Verlangsamung der Fortpflanzung des Schalles namentlich in engen Röhren, welche sowohl aus seinen eigenen Versuchen als auch denen von Regnault sich ergeben hatte.

Man kann die Kenntniß der Schallgeschwindigkeit zuweilen bei der Abschätzung größerer Entfernungen z. B. derjenigen eines Gewitters practisch verwerthen. Man zählt zu diesem Zwecke die Zahl der Pulsschläge, welche zwischen der Wahrnehmung des Blitzes und derjenigen des Donners verfließt. Jedem Pulsschlage entsprechen etwa 700 Fuß (220 Meter). In ähnlicher Weise haben Reisende die Entfernungen mancher Orte mit Hülfe von abgefeuerten Schüssen bestimmt. Auch die Tiefe von Schachten oder Brunnen läßt sich dadurch ermitteln, wenn man einen Stein

hineinfallen läßt und die Zeit beobachtet, welche zwischen dem Beginne des Falles und der Wahrnehmung des Schalles verfließt. Dieselbe ist offenbar aus der Zeit, welche der Stein zum Fallen gebraucht und derjenigen welche der Schall zum Durchlaufen des Schachtes, ehe er in unser Ohr gelangt, gebraucht, zusammengesetzt. Newton hat die zugehörige Formel zuerst aufgestellt, welche (nach der Berechnung von Radau) für Intervalle von

2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 Secunden

Tiefen von resp.

58, 125, 217, 330, 465, 618, 789, 977, 1182 Fuß

ergibt.

5. Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Flüssigkeiten und festen Körpern. — Die bekannte Thatsache, daß Fische, Krebse und andere Wasserthiere Gehörorgane haben und daß sich z. B. Karpfen durch den Klang einer Glocke auf weite Entfernung herbeilocken lassen, zeigt, daß das Wasser ein guter Leiter des Schalles ist. Genauere Versuche über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Wasser sind im Jahre 1826 von den Physikern Colladon und Sturm im Genfer See angestellt. Sie erregten an einer Stelle durch Anschlagen einer 130 Pfund schweren Glocke unter Wasser einen Schall in demselben und fingen ihn in einer Entfernung von nahezu 2 Meilen mittels einer Art Hörrohr auf, dessen mit einer Membran verschlossene Mündung der Schallquelle zugekehrt war und im Uebrigen aus ein konischen Röhre von 15 Fuß Länge bestand. Der Augenblick der Entstehung des Schalles wurde durch einen Pulverblitz markirt. Es ergab sich so eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 1435 Meter oder 4420 pariser Fuß; dieselbe ist also 4,3 mal so groß als in der Luft.

Für andere Flüssigkeiten hat man auf indirectem Wege, indem man Orgelpfeifen in ihnen tönen ließ, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bestimmt. Aus der Tonhöhe ergibt sich nämlich zunächst die Zahl der Schwingungen (n) in der Secunde, und da man außerdem die Wellenlänge (l) sehr genau messen kann*, so

* Sie ist z. B. bei einer offenen Orgelpfeife, die ihren Grundton angibt, gleich der doppelten Länge derselben.

ergibt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c nach der in §. 3 der Wellenlehre angegebenen Gleichung

$$c = n\ l.$$

Auf diesem Wege bestimmte Wertheim, von dem diese Beobachtungsmethode herrührt, den Werth von c für verschiedene Flüssigkeiten. Er fand z. B. für Alkohol und Aether $c = 1160$ Meter.

Derselbe Physiker ermittelte auch durch ein anderes auf die Vibrationstheorie gegründetes indirectes Verfahren die Geschwindigkeit des Schalles in verschiedenen festen Körpern. In diesen ist sie noch größer als in Flüssigkeiten. Er fand dafür u. A. folgende Werthe:

im Blei	4000	Fuß
„ Silber und Platin	11400	„
„ Eisen und Stahl	15400	„
„ Spiegelglas	16000	„

Es sei hier noch kurz erwähnt, daß in neuester Zeit Kundt durch eine sinnreiche Methode mit großer Genauigkeit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles sowohl in verschiedenen festen Körpern, wenn dieselben eine Stabform besitzen, als auch in Gasen, welche in Röhren eingeschlossen sind, bestimmt hat. Er erregte nämlich, indem er die Röhre in Longitudinalschwingungen versetzte, die auf die Luftsäule übertragen wurden, im Innern derselben Staubfiguren, an denen sich die Lage der Knotenpunkte der stehenden Wellen der Luft sehr genau erkennen ließ; der Abstand zweier auf einander folgender Knotenpunkte ist aber nach dem früheren (vergl. Wellenlehre § 13) gleich einer halben Wellenlänge. Zugleich ist aber die Länge der tönenden Röhre, wenn dieselbe in der Mitte befestigt ist, gleich einer halben Wellenlänge für den betreffenden Stoff, aus welchem sie gefertigt ist. Man kennt also das Verhältniß der Wellenlängen für denselben Ton, mithin (nach der oben schon angewandten Gleichung a, § 3 der Wellenlehre) auch das der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, da sich für dasselbe n verhält

$$c : c' = l : l'$$

Besonders gut wird der Schall im Tannenholze fortgepflanzt.

Legt man das Ohr an ein langes Brett und auf das andere Ende desselben eine Taschenuhr, oder ritzt dasselbe mit einer Nadel, so hört man in beiden Fällen deutlich den erregten Schall, obgleich derselbe so schwach ist, daß man ihn in der Luft auf gleiche Entfernung nicht mehr wahrnimmt. Wheatstone leitete den Klang musikalischer Instrumente, welche im Keller gespielt wurden, durch mehrere Stockwerke, indem er tannene Stäbe mit dem Resonanzboden oder anderen stark vibrirenden Theilen derselben in Verbindung setzte. Die anderen Enden der Stäbe, welche sich in dem Auditorium befanden, waren mit Holzplatten versehen, zur stärkeren Uebertragung des Schalles an die Luft. Der Eindruck war nahe derselbe, als wenn sich die Instrumente in dem Zimmer befunden hätten.

Auch der Erdboden leitet den Schall auf große Entfernungen hin. Kanonendonner kann man bis auf mehr als 5 Meilen Entfernung hören, wenn man das Ohr an den Erdboden legt. Auch durch eine Trommel, auf deren Membrane kleine Steinchen liegen, kann man sich überzeugen, daß die Erschütterungen des Erdbodens sich bis auf weite Strecken fortpflanzen. Bekannt ist auch, daß Mineure bei Belagerungen die größte Vorsicht anwenden müssen, um sich nicht vorzeitig ihren ebenfalls unter der Erde arbeitenden Gegnern zu verrathen. In Bergwerken zeigt sich dieselbe Erscheinung.

Auch durch gespannte Fäden pflanzt sich der Schall sehr gut fort. Bindet man einen silbernen Löffel oder eine Glocke an einen Faden, dessen oberes Ende man mit den Zähnen festhält, verschließt dann die Ohren mit den Fingern und bringt den unten hängenden Gegenstand durch Anschlagen zum Tönen, so hört man sehr starke Klänge. Hieraus folgt beiläufig auch, daß die Knochen den Schall ebenfalls gut fortleiten. Spannt man zwischen den Böden zweier offenen Tannenkästchen eine mehrere hundert Meter lange Schnur möglichst straff aus, so kann man nach Weinhold sogar Worte, welche in das eine hinein gesprochen werden, an dem anderen verstehen, wenn man das Ohr in die Mündung desselben hineinhält.*

---

* Vergl. Weinhold's Vorschule der Experimentalphysik, Leipzig, Quandt und Händel 1872, pag. 216.

Läßt man taubstumme Personen, deren Gehörnerv indessen nicht gelähmt ist, einen tönenden Körper, z. B. einen auf den Resonanzboden eines Pianofortes gestemmten Tannenstab zwischen die Zähne nehmen, so hören sie den Schall.

Weiche und unelastische Stoffe, namentlich wenn sie porös sind, wie Mehl, Pelzhaare, Teppiche, Vorhänge aus dickem Wollenzeuge leiten den Schall in sehr geringem Grade.

5. Intensität des Schalles. In der Wellenlehre, § 12, haben wir gezeigt, daß die Intensität jeder Wellenbewegung in homogenen elastischen Medien mit dem Quadrate der Entfernung proportional abnimmt. Die Stärke der Wahrnehmung des Schalles hängt jedoch, unbeschadet der Gültigkeit des genannten ganz allgemeinen Gesetzes, auch wesentlich von der Natur des Mediums ab, in welchem die Erregung stattfand. Wir haben gesehen, daß in verdünnter Luft der Schall unter übrigens gleichen Umständen viel schwächer erscheint, als es bei Luft von gewöhnlicher Dichtigkeit der Fall ist. Aehnliches zeigt sich beim leichten Wasserstoffgase. Füllt man die Lungen damit, so klingt die Stimme ganz dünn und näselnd. Umgekehrt wird in verdichteter Luft der Schall stärker fortgepflanzt, wie man u. A. in den Taucherglocken bemerkt hat. Ebenso erscheint der Schall im Wasser viel stärker. Franklin hörte das Zusammenschlagen zweier Steine unter Wasser auf mehr als eine halbe englische Meile.

Eine wesentliche Schwächung des Schalles tritt beim Uebergange von einem Medium in ein anderes ein, indem die Schallwellen (nach § 13 der Wellenlehre) dabei zum Theil reflectirt werden. Nach dem Früheren geschieht dieses namentlich beim Uebergange in ein dichteres Medium, z. B. aus der Luft in Wasser, während im umgekehrten Falle die Schwächung viel weniger bemerklich ist. Daher hört man die Schläge gegen eine Glocke im Wasser aus 30 Fuß Tiefe ganz deutlich, während die Taucher die aus der Luft kommenden Töne nur schwach vernehmen. So dringt auch der Schall leichter vom Fuße zum Gipfel hoher Berge, als umgekehrt. Daß der Schall des Nachts auf weiteren Strecken wahrgenommen wird, hat seinen Grund

zum Theil gewiß darin, daß wegen der größeren Ruhe der Luft der Wechsel von Luftschichten verschiedner Dichtigkeit nicht so stark ist als am Tage, wenngleich auch die nächtliche Stille und die dadurch erhöhte Empfindlichkeit des Ohres dabei eine nicht unwesentliche Rolle spielen mögen.

Auch die Kälte vergrößert die Tragweite des Schalles. Parry hörte in den Polargegenden eine nicht ungewöhnlich laute Unterhaltung in der Entfernung einer englischen Meile. Aehnliche Beobachtungen hat man auf den Gipfeln hoher Berge gemacht. Hieraus geht hervor, daß nicht die durch die Kälte hervorgebrachte Verdichtung der Luft es ist, durch welche die Tragweite des Schalles so erhöht wird. Wahrscheinlich spielt in den beiden angeführten Fällen die Stille der Natur in der Polar- und Schneeregion ebenfalls eine Hauptrolle.

Der Wind schwächt unter allen Umständen den Schall, wenngleich man bedeutend besser unter dem Winde hört, als über demselben. Genaue Messungen darüber sind deswegen schwierig anzustellen, weil es noch kein Instrument zur genauen Messung der Schallintensität gibt, man dabei vielmehr auf die Empfindlichkeit des Ohres angewiesen ist. Diese bietet aber einen sehr unsicheren Maßstab, da sie geringer wird, wenn der Nerv ermüdet ist, bei verschiedenen Personen, ja sogar häufig bei derselben Person, für die beiden Ohren verschieden ist und außerdem von der Höhe der Töne abhängt.

Sprachrohre. Die Tragweite der menschlichen Stimme kann durch Sprachrohre bedeutend verstärkt werden. Ein solches besteht der Hauptsache nach aus einem konischen Rohre, an dessen Spitze sich ein Mundstück befindet, während das andere Ende mit einem ebenfalls konischen aber stärker divergirenden weiten Schallbecher versehen ist. Die gewöhnliche Länge der auf Schiffen gebräuchlichen Sprachrohre beträgt 6 Fuß bei 10 Zoll Oeffnung. Man hat jedoch auch welche von 24 Fuß Länge verfertigt, mit welchen man sich bis auf eine halbe deutsche Meile verständlich machen konnte. Die Wirkung der Sprachrohre wird gewöhnlich durch die Reflection an den Wänden erklärt; daß dieses nicht richtig ist, lehrt eine Beobachtung von Hassenfratz, nach welcher

fast keine Verminderung der Wirkung eintritt, wenn man die innere Höhlung mit Wolle ausfüttert. Auch ließe sich dann kaum die Wirkung des Schallbechers erklären, der nach allen Beobachtungen einen wesentlichen Bestandtheil des Sprachrohres bildet. Man muß daher mit Radau* annehmen, daß die Verstärkung des Schalles, zumal dieselbe nicht nur in der Richtung der Axe, sondern nach allen Seiten hin stattfindet, wesentlich von der geometrischen Gestalt der eingeschlossenen Luftsäule abhängt, welche die Quelle der Erschütterungen ist. Durch die Schallröhre wird eben die Zerstreuung der Luftwellen gehindert, bis sie kräftig geworden sind.

Communicationsröhren. In langen, seitlich geschlossenen Röhren pflanzt sich der Schall bis auf gewisse Strecken hin fort, ohne merklich an Stärke einzubüßen. Am Deutlichsten zeigen dieses die sogenannten Communicationsröhren, wie sie auf Schiffen, in Fabriken, Hotels ꝛc. angewendet werden. Bei den schon erwähnten Versuchen, welche Biot über die Fortpflanzung des Schalles in den Röhren der pariser Wasserleitung anstellte, bemerkte er, daß auch der leiseste Ton sich ungeschwächt bis auf 3000 Fuß Entfernung fortpflanzte. Ebenso pflanzen auch zuweilen Kaminröhren den Schall auffallend gut fort, so daß man durch dieselben deutlich Gespräche von der Straße vernimmt. Sogar über glatte Wasserflächen gleitet der Schall leichter und weiter fort, als über das Land. Aehnliche Wirkungen zeigen sich an Gewölben aus glatten Wänden, wie die Sprachgewölbe und Flüstergrotten lehren, in denen man leise gesprochene Worte auf weite Entfernungen hin versteht, wie es z. B. in dem 47 Fuß langen Ohre des Dionys der Fall ist, einer gewundenen Höhle, an deren Decke der Länge nach, etwa 90 Fuß über dem Boden, eine etwa 2,2 Fuß breite Rinne hinläuft.

Hörrohre. Zum Auffangen und zur Verstärkung des Schalles dienen auch die Hörrohre, gewissermaßen umgekehrte Sprachrohre, welche mit der weiteren Mündung, dem Schall-

---

* „Lehre vom Schall", pag. 85. Diesem Werke sind die in den beiden Abschnitten von der Fortpflanzung und Stärke des Schalles enthaltenen Angaben zum Theil entnommen.

becher, der Schallquelle zugekehrt sind, während das schmale Ende in das Ohr gesteckt wird. Ihre Wirkung wird bedeutend erhöht, wenn man sie schneckenförmig windet. In neuerer Zeit hat der Akustiker König in Paris ein Hörrohr construirt, bei welchem über dem zum Auffangen des Schalles bestimmten Schallbecher, welcher die Form einer halbkugelförmigen Kapsel hat, eine dünne Membran gespannt ist, während dieselbe andererseits mit einem Gummischlauche communicirt, der am Ende mit einer elfenbeinernen Spitze versehen ist, welche in das Ohr gesteckt wird. Die Membrane wirkt hier wie ein künstliches Trommelfell, indem sie, wenn man dagegen spricht, in Vibrationen geräth, die sich der eingeschlossenen Luft mittheilen und so zum Ohre gelangen. Durch eine einfache Abänderung läßt sich dieses Hörrohr in ein Stethoscop, d. i. ein Instrument zur Untersuchung der Athmungsgeräusche, verwandeln.

6. Reflection der Schallwellen. Echo. — Wie bereits angedeutet, werden die Schallwellen, wenn sie auf eine feste Wand oder überhaupt auf die Grenzfläche zweier verschiedener Medien treffen, um so stärker reflectirt, je größer die Dichtigkeit des zweiten Mediums im Verhältniß zu der des ersten ist. Versteht man unter Schallstrahl die gerade Linie, welche vom Mittelpunkte der Schallwelle nach einem Punkte der Grenzfläche gezogen ist, welcher von ihr getroffen wird, so bildet nach § 13, a der Wellenlehre der reflectirte Strahl mit der Grenzfläche (wenn dieselbe als eben angenommen wird, sonst mit ihrer Berührungsebene) denselben Winkel wie der auffallende Strahl. Auf der Zurückwerfung der Schallstrahlen beruht die Entstehung des Echos. Nach dem Obigen kann man den Wiederhall seiner eigenen Stimme nur dann hören, wenn man senkrecht gegen die Wand ruft, während man, um das Echo der Stimme einer zweiten Person zu hören, sich in die Richtung der reflectirten Strahlen stellen muß. Man hört dann also den von derselben Quelle ausgehenden Strahl zweimal: direct und durch Zurückwerfung. Da zum Aussprechen einer Silbe wenigstens etwa $^1/_5$ Secunde erforderlich ist, der Schall aber in $^1/_{10}$ Secunde 33^m zurücklegt, so muß man wenigstens so weit von der Wand entfernt sein, wenn man ein einsilbiges Echo hören will. Für ein zweisilbiges

ist natürlich die doppelte Distanz erforderlich; im Allgemeinen muß dieselbe so groß sein, daß am Ende des Aussprechens der erste Schall zwischen der Schallquelle und der Wand hin und her gelaufen ist. Bei den seitlichen Echos kommt es offenbar auf den Unterschied der directen Entfernung und der Summe der Schallstrahlen an. Sind mehrere parallele Wände in verschiedenen Entfernungen vorhanden, so kann man dasselbe Wort eben so oft hinter einander hören. Dabei muß natürlich die Entfernung der zweiten und jeder folgenden Wand hinreichend groß sein, daß die Schalle getrennt zum Ohre gelangen können.

Uebrigens spielen bei der Entstehung des Echos außer der Zurückwerfung der Schallstrahlen auch noch andere Umstände mit, namentlich die Resonanz (vergl. §. 13) da selbst sehr rauhe unebene Flächen z. B. eine Waldschlucht, ein sehr deutliches Echo hervorrufen können. Auf der Zurückwerfung des Schalles beruhen auch die Effecte der Schallgrotten. Wird in dem einen Brennpunkte (*A*) eines ellipsenförmigen Gewölbes ein Schall erregt, so sammeln sich die reflectirten Schallstrahlen in dem andern Brennpunkte (*B*). Wird also in *A* leise gesprochen, so kann ein in *B* befindliches Ohr die Worte verstehen.

7. Brechung des Schalles. — Wie oben bereits erwähnt, werden die Schallwellen beim Uebergange in ein anderes Medium auch gebrochen und zwar (nach dem in §. 13 *b* der Wellenlehre erläuterten allgemeinem Gesetze) um so mehr, je größer die Veränderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist. Man kann die Schallstrahlen daher auch ähnlich wie Lichtstrahlen durch linsenförmige Hohlräume, welche mit stark brechenden Gasen z. B. Kohlensäure gefüllt sind, in einem Punkte vereinigen. Solche Linsen lassen sich aus Collodium- oder Kautschuckhäutchen herstellen. Hängt man eine Taschenuhr in passender Entfernung von der Linse in einem Punkte ihrer Axe auf, so hört man ihr Ticken besonders deutlich in einem Punkte auf der andern Seite derselben, welcher als der Vereinigungspunkt der gebrochenen Strahlen anzusehen ist.

8. Geräusch und Klang. — Bisher haben wir nur die kurzdauernden Schallempfindungen betrachtet, welche durch ein-

fache Luftwellen hervorgebracht werden. Die beiden andern Arten der im Anfange dieses Kapitels aufgeführten Schallempfindungen: das Geräusch und der Klang unterscheiden sich von ihnen zunächst durch längere Dauer. Während indessen das Geräusch durch einen schnellen Wechsel der Empfindungen charakterisirt ist, erscheint ein musikalischer Klang vollkommen gleichmäßig, so daß sich kein Wechsel verschiedenartiger Bestandtheile in ihm unterscheiden läßt. Diesen Verschiedenheiten der Empfindung entsprechen solche der äußeren Erregungsmittel. Ein Geräusch entsteht, wenn eine Reihe verschiedener Schallwellen in unregelmäßiger Aufeinanderfolge das Ohr trifft. Man erkennt dieses sofort wenn man an solche Geräusche denkt, wie sie entstehen, wenn z. B. ein Pelotonfeuer abgegeben wird, ein Wagen über das Pflaster rollt, eine Hand voll Kies gegen die Fensterscheiben geworfen wird 2c. Die deutsche Sprache ist reich an Bezeichnungen für die verschiedenartigen Geräusche, welche meistens als Klangnachahmungen (Onomatopoiieen) zu betrachten sind, wie: rasseln, prasseln, plätschern, brausen, sausen 2c. Für das Folgende ist von Wichtigkeit, daß man Geräusche auch aus musikalischen Klängen zusammensetzen kann. Fährt man schnell mit einem Tuche über die Saiten eines Pianofortes oder drückt man sämmtliche Tasten mehrerer Octaven zugleich nieder, rufen viele Menschen gleichzeitig in verschiedenen Tonhöhen, so entstehen dumpfe und verworrene Geräusche. Somit ist der musikalische Klang resp. Ton als eine einfachere Schallempfindung zu betrachten.

Wir hören bei normaler Beschaffenheit unseres Ohres einen Klang resp. Ton jedesmal dann, wenn das Trommelfell unseres Ohres durch hinreichend schnelle periodische Wellenbewegungen der Luft in eben solche Schwingungen versetzt wird, oder wenn dieselben auf andere Weise (z. B. durch die Zähne und die mit ihnen in Verbindung stehenden Knochen des Kopfes) zu den Gehörnerven fortgepflanzt werden. An einem musikalischen Klange läßt sich die Höhe, Stärke und Farbe unterscheiden. Unter der Klangfarbe hat man diejenige Eigenthümlichkeit zu verstehen, durch welche sich Klänge

verschiedenartigen Ursprunges, z. B. einer Flöte und einer Geige bei übrigens gleicher Höhe und Stärke noch von einander unterscheiden. Worauf die Unterschiede der Klangfarbe beruhen, werden wir später sehen. Die Tonhöhe hängt von der Schnelligkeit in der Aufeinanderfolge der einzelnen Schwingungen, die Stärke des Tones von der Breite der Schwingungen ab (vergl. §. 12 der Wellenlehre). Man erkennt dieses zunächst leicht durch Beobachtung einer tönenden Saite. Die Bewegung einer solchen ist derjenigen einer schweren elastischen Schnur oder Spiralfeder, welche an beiden Enden befestigt ist, vollständig analog. Zieht man eine solche, indem man sie etwa in der Mitte ihrer Länge zwischen dem Daumen und dem Zeigefinger faßt, zur Seite und läßt sie dann plötzlich los, so macht sie eine Reihe von isochronen (transversalen) Schwingungen, wobei jeder Punkt derselben sich pendelartig bewegt. Allmälig nimmt die Breite der Schwingungen ab und die Schnur gelangt zur Ruhe. Ganz dasselbe findet bei einer stark gespannten Metall- oder Darmsaite statt, nur daß hier die Schwingungen mit viel größerer Schnelligkeit auf einander folgen. Zieht man eine solche kräftig, so hört man einen Klang, dessen Stärke allmälig abnimmt, während zugleich die Breite der Schwingungen geringer wird, wie man deutlich erkennt, wenngleich man die einzelnen Schwingungen mit dem Auge nicht mehr verfolgen kann, dieselben vielmehr wegen der Dauer des Lichteindruckes im Auge für die Wahrnehmung mit einander verschmelzen.

9. Tonhöhe und Stärke eines Klanges. — Je stärker man die Saite spannt, desto schneller folgen sich die Schwingungen und desto größer wird die Tonhöhe.

Aehnliche Beobachtungen lassen sich an einer tönenden Stimmgabel machen. Befestigt man an einer Zinke derselben mit Wachs eine rechtwinklich zur Ebene der beiden Zinken umgebogene Borste oder eine Spitze von dünnem Kupferblech, schlägt dann die Gabel an und fährt, während sie tönt, mit gleichförmiger Geschwindigkeit über ein berußtes Glas, so bemerkt man erstlich, daß die Spitze eine regelmäßige Wellenlinie beschrieben hat, welche in verkleinertem Maßstabe dieselbe Gestalt wie die Sinus- oder

Pendelcurve besitzt (vergl. Wellenlehre §. 7). Sodann zeigt sich, daß die Höhe der Berge und die Tiefe der Thäler mit der Stärke des Tones abnimmt, während die Längen derselben unverändert bleiben. Macht man denselben Versuch zugleich mit zwei Stimmgabeln, von denen die eine einen höheren Ton gibt, so zeigt die von der letzteren beschriebene Curve auf derselben Strecke eine größere Zahl von Wellen wie die erstere.

Aus dem Gesagten geht, abgesehen von den bereits bei dem entsprechenden Versuche mit der Saite gezogenen Folgerungen über die Höhe und Stärke des Tones noch hervor, daß die Zinken einer Stimmgabel während des Tönens derselben ebenfalls pendelartige Schwingungen, allerdings von kurzer Dauer, machen. Befestigt man an beiden eine Schreibspitze, so erkennt man noch, daß dieselben sich gleichzeitig einander nähern und von einander entfernen.

10. Bestimmung der Schwingungszahl. — a. Graphische Methode. Da bei jeder Schwingung eine Luftwelle entsteht, so kann man jede Zinke als Mittelpunkt eines Systems von concentrischen Kugelwellen ansehen, die in regelmäßigen Abständen von je einer Wellenlänge auf einander folgen (vergl. Wellenlehre §. 3). Die letztere (l) ist nach der schon öfter benutzten Gleichung

$$n\,l = c \text{ oder } l = \frac{c}{n}$$

leicht zu bestimmen, wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles (c) und die Zahl der in einer Secunde vollführten Schwingungen (n) kennt. Zur Bestimmung der letzteren ist es nur nothwendig die Länge zu messen, um welche man bei dem oben angeführten Versuche die Gabel während einer Secunde fortgezogen hat. Beträgt diese z. B. 1^{dm} und zählt man auf dieser Strecke 100 Wellen der von der tönenden Gabel auf dem berußten Glase beschriebenen Schwingungscurve, so ist $n = 100$; mithin würde für den Ton dieser Gabel

$$l = \frac{331}{100} = 3{,}31^{m}$$

sein, wenn man für c wie früher den Werth 331^{m} annimmt.

Gewöhnlich stellt man den Versuch in der Weise an, daß man den Stiel der tönenden Gabel in einem Klotze befestigt und von dem an ihr befindlichen Schreibstifte die Schwingungscurve auf der Oberfläche eine Walze beschreiben läßt, welche durch ein Uhrwerk mit constanter und bekannter Geschwindigkeit gedreht wird. Die Secundenpunkte kann man, wie im §. 1 angegeben ist, markiren.

Phonautograph. Flammenresonator. Durch eine leichte Abänderung des soeben beschriebenen Apparats kann man sich überzeugen, daß mit jedem musikalischen Klange von bestimmter Höhe, auf welche Art derselbe auch hervorgebracht sein mag, eine periodische Wellenbewegung der Luft verbunden ist. Zu diesem Zwecke bringt man statt der Stimmgabel neben der Walze eine dünne über die engere Mündung eines Schallbechers ausgespannte Membran und befestigt an diese einen leichten Schreibstift. Eine solche Membran wird, wie wir bereits bei der Beschreibung des König'schen Hörrohres erwähnten, durch jede Lufterschütterung leicht in Mitschwingung versetzt und durch den Schreibstift werden ihre Vibrationen auf die Walze übertragen. Durch jeden musikalischen Klang kann man nun auf diese Weise eine Schwingungscurve hervorrufen. Die nähere Untersuchung solcher Curven zeigt, daß in ihnen eine gewisse Wellenform sich periodisch, den einzelnen Vibrationen entsprechend, wiederholt, zugleich aber auch, daß die Schwingungszahl eines Tones nur von seiner Höhe, nicht aber von der Art seiner Erregung abhängt. Dagegen zeigt sich allerdings — und die Wichtigkeit dieser Thatsache wird im Folgenden hervortreten — daß die Curven welche Klängen gleicher Höhe aber verschiedener Klangfarbe entsprechen, sehr verschiedenartig gestaltete Berge und Thäler besitzen, wenngleich die Formen derselben periodisch wiederkehren. So sieht man namentlich bei scharfen und rauhen Klängen, statt der einfachen und sanften Krümmungen der von der Stimmgabel gezeichneten Sinuscurve, jede einzelne Welle mit vielfachen unregelmäßigen Ausbiegungen versehen, die sich natürlich ebenfalls periodisch wiederholen. Auf die Entstehung dieser verschiedenen

periodischen Formen und ihren Zusammenhang mit der Klangfarbe werden wir weiter unten genauer eingehen.

Der in dem Vorstehenden beschriebene Apparat, durch den also Luftschwingungen, welche mit beliebigen Klängen oder sogar unregelmäßigen Geräuschen verbunden sind, registrirt, gewissermaßen aufgeschrieben werden, der Art, daß man aus der von ihnen gezeichneten Schwingungscurve nicht nur die Dauer jeder Schwingung, sondern auch den Verlauf derselben erkennen kann, heißt Phonautograph. Handelt es sich nicht darum, die einzelnen Schwingungen zu fixiren, sondern dieselben nur dem Auge sichtbar zu machen, so kann man die Vibrationen der Membran statt auf einen Schreibstift auch auf eine Gasflamme übertragen und deren Bild in ihren verschiedenen Schwingungsphasen vermittelst eines Drehspiegels dem Auge vorüberführen. Hierauf beruht das König'sche Flammenmanometer. Es ist dieses eine kleine runde Kapsel, deren Boden durch ein Gummihäutchen gebildet ist, während aus dem Deckel zwei Röhren hervorgehen, eine zum Hineinleiten des Gases, die andere zur Speisung eines kleinen Brenners. Versieht man die Kapsel mit einem trichterförmigen Ansatz und steckt auf diesen einen Gummischlauch mit Mundstück, so kann man vermittelst dieses Apparates die Luftschwingungen, welche z. B. von der menschlichen Stimme hervorgebracht werden, in großem Maße sichtbar machen. Singt man nämlich in das Mundstück hinein, so erblickt man in dem gedrehten Spiegel ein gezacktes bandförmiges Flammenbild, welches als eine Art Schwingungscurve des betreffenden Tones zu betrachten ist. Die Zacken desselben liegen demnach um so näher, je höher der Ton ist.

b. Sirene. Zur genaueren Bestimmung der Schwingungszahl eines Tones, sowie namentlich auch der Intervallen-Verhältnisse, benutzt man neben dem Phonautographen gewöhnlich die Sirene. Der Haupttheil derselben ist eine um ihren Mittelpunkt leicht drehbare Kreisscheibe, welche mit einer oder mehreren Reihen von kleinen Löchern versehen ist, die auf concentrischen Kreisen in gleichen Abständen von einander vertheilt sind. Bläst man, während die Scheibe gedreht wird, gegen eine

dieser Löcherreihen, so hört man zuerst, bei langsamer Bewegung, die einzelnen Luftstöße, welche beim Vorübergange eines Loches vor der Mündung des Blasrohres entstehen, von einander getrennt. Steigert man aber die Umdrehungsgeschwindigkeit hinreichend, so verschmelzen dieselben zu einem Klange, dessen Höhe mit der Schnelligkeit der Drehung zunimmt. Denkt man sich nun die Scheibe mit einem Zählerwerk versehen, an welchem man die Zahl der z. B. in einer Secunde erfolgten Umdrehungen ablesen kann, und kennt man die Zahl der auf dem betreffenden Kreise der Scheibe befindlichen Löcher, so läßt sich daraus unmittelbar die Schwingungszahl des von den Sirenen hervorgebrachten Klanges finden. Sind z. B. 12 Löcher auf dem Kreise vertheilt und 20 Umdrehungen in der Secunde erfolgt, so werden 240 Lufterschütterungen in der Secunde hervorgebracht sein, also ist $n = 240$. Hat man nun die Schwingungszahl eines beliebigen auf andere Weise erzeugten Klanges zu bestimmen, so steigert man die Umdrehungsgeschwindigkeit der Sirene so lange bis ihre Tonhöhe mit der des zu untersuchenden Klanges übereinstimmt und verfährt dann wie oben. Die einfachsten Sirenen bestehen aus einer durchlöcherten Pappscheibe. Bei der Dove'schen Sirene wird die Scheibe durch denselben Luftstrom welcher den Ton hervorbringt zugleich in Bewegung gesetzt, bei der König'schen Sirene geschieht dieses durch ein starkes Uhrwerk.

Intervalle. — Sind auf der Scheibe der Sirene 4 Reihen von resp. 8, 10, 12, 16 Löchern (Verhältniß: 4 : 5 : 6 : 8) angebracht, so hört man, wie schnell auch die Scheibe gedreht werden mag, stets das Intervall des Duraccordes.

Hieraus geht hervor, daß die Intervalle allein durch das Verhältniß der Schwingungszahlen bestimmt sind. Aus dem Obigen folgt zunächst, daß dieses Verhältniß ist

für die	Octave	1 : 2
„ „	Quinte	2 : 3
„ „	Quarte	3 : 4
„ „	große Terz	4 : 5
„ „	kleine Terz	5 : 6

Nimmt man zu dem Durdreiklange (z. B. *C : E : G*) noch den der Dominante (Quinte) *(G : H : D)* und den der Unterdominante *(F : A : C)* hinzu, welche beide je einen Ton mit dem Dreiklange der Tonica *(C)* gemeinsam haben, so ergeben sich für sämmtliche Töne, z. B. der *C*-Dur-Tonleiter folgende Verhältnisse:

$$C : D : E : F : G : A : H : C$$

$$1 : \tfrac{9}{8} : \tfrac{5}{4} : \tfrac{4}{3} : \tfrac{3}{2} : \tfrac{5}{3} : \tfrac{15}{8} : 2,$$

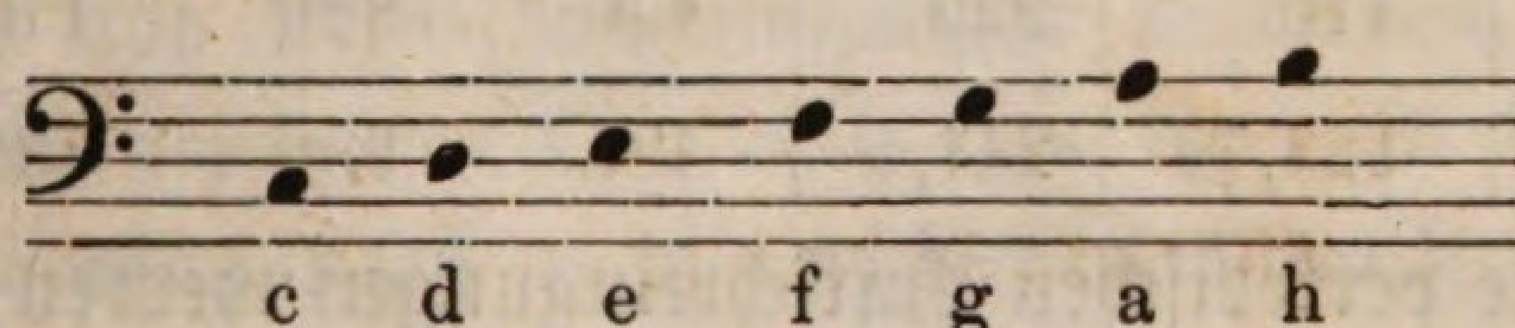
oder in ganzen Zahlen

$$24 : 27 : 30 : 32 : 36 : 40 : 45 : 48.$$

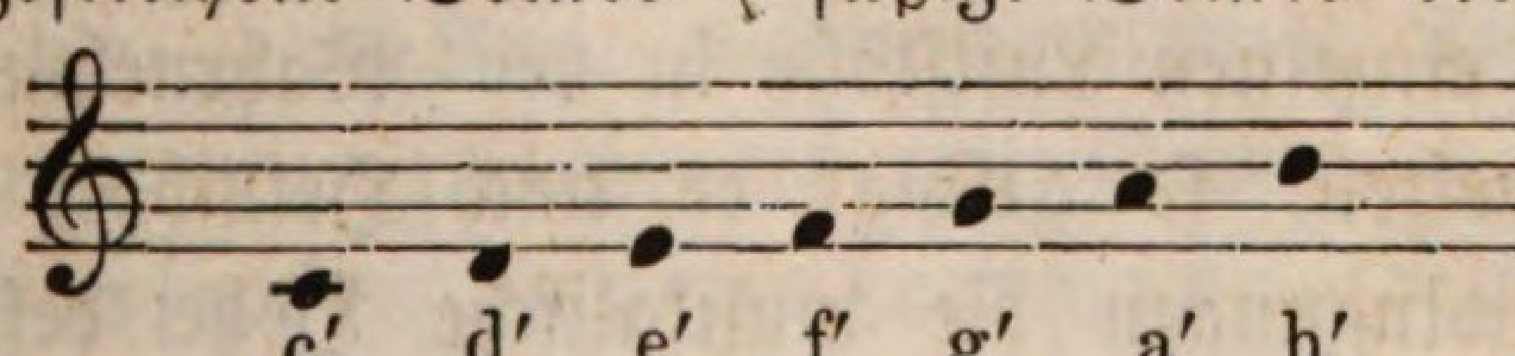
Es geht hieraus hervor, daß man, wenn die Schwingungszahl *(n)* eines beliebigen Tones z. B. einer Stimmgabel ermittelt ist, diejenige eines beliebigen anderen Tones, dessen Intervall zum ersten Tone man kennt, durch einfache Multiplication mit der betreffenden Verhältnißzahl finden kann.

Zur genauen Angabe der Schwingungszahlen ist die Kenntniß der Bezeichnungsweise der verschiedenen Tonlagen durch Buchstaben erforderlich, die sich am einfachsten wie folgt mit Hülfe der Notenschrift erläutern läßt:

1) Ungestrichene oder kleine Octave (4füßige Octave der Orgel)



2) Eingestrichene Octave (2füßige Octave der Orgel)

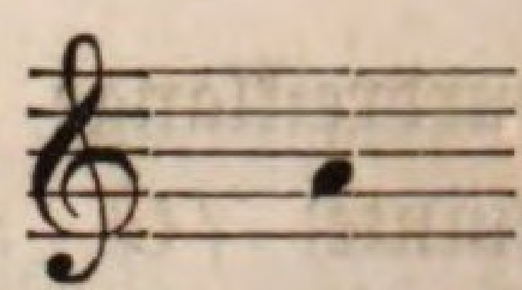


Hierauf folgt als nächst höhere die zweigestrichene Octave: c″ d″ 2c. Die Octaven abwärts von den ungestrichenen bezeichnet man durch große Buchstaben, also nach der Reihe durch

$C_1 \cdots$ bis H_1 oder auch durch $c^{-1} \cdots$ bis h^{-1}

$C_2 \cdots$ „ H_2 „ „ „ $c^{-2} \cdots$ „ h^{-2} u. s. f.

Nach der von Scheibler i. J. 1833 gegebenen Bestimmung nimmt man gewöhnlich an, daß das eingestrichene a, also



440 Doppelschwingungen in der Secunde mache, deren jede aus einem Hin- und Hergange besteht. Es sei hier erwähnt, daß die Franzosen gewöhnlich nach einfachen Schwingungen rechnen. Nach dieser Bezeichnungsweise würde also das obige a die Schwingungszahl $n = 880$ haben. Nach Doppelschwingungen gerechnet sind nun die Schwingungszahlen derjenigen Töne, welche innerhalb der sieben in der Musik gebräuchlichen Octaven liegen, folgende:

Noten	Contra Octave $C_1 - H_1$	Große Octave $C - H$	Ungestrichene Octave $c - h$	Eingestrichene Octave $c' - h'$	Zweigestrichene Octave $c'' - h''$	Dreigestrichene Octave $c''' - h'''$	Viergestrichene Octave $c'''' - h''''$
C	33	66	132	264	528	1056	2112
D	37,125	74,25	148,5	297	594	1188	2376
E	41,25	82,5	165	330	660	1320	2640
F	44	88	176	352	704	1408	2816
G	49,5	99	198	396	792	1584	3168
A	55	110	220	440	880	1760	3520
H	61,875	123,75	247,5	495	990	1980	3960

Nicht alle periodischen Luftschwingungen werden als Töne empfunden. Wenngleich bei etwa 30 Doppelschwingungen in der Secunde die einzelnen Luftstöße in der Wahrnehmung zu einem Tone verschmelzen, so gelingt es nach Helmholtz doch erst bei etwa 40 Schwingungen die musikalische Höhe desselben zu bestimmen. Die gewöhnliche Angabe, welche auf den Experimenten Savarts beruht, die nach einer unsicheren Methode angestellt wurden, kann man durch die Untersuchungen von Helmholtz als widerlegt ansehen.

Die Fähigkeit, sehr hohe Töne wahrzunehmen, wie diejenigen, welche von der Fledermaus oder gewissen Insecten beim Fluge hervorgebracht werden, ist bei verschiedenen Personen verschieden und nimmt im Allgemeinen mit dem Alter ab. Künstlich lassen

sich sehr hohe Töne durch kleine Stimmgabeln hervorbringen, die man mit dem Violinbogen streicht. Wenn es sich indessen um zuverlässige Bestimmungen der Schwingungszahlen handelt, sind dazu nach König kleine Stäbe von Stahl oder Glas geeigneter, welche in Longitudinalschwingungen versetzt werden.

Auf diese Weise hat man gefunden, daß nur wenige Personen einen Ton von 24000 doppelten Schwingungen noch wahrnehmen, so daß hier etwa die Grenze der Hörbarkeit liegt. Nach Wollaston hören viele Leute nicht mehr das Gezirp der Grille oder selbst das Zwitschern der Sperlinge. Tyndall erzählt, daß ein Begleiter von ihm auf einer Alpenreise das Summen der Insecten, von denen die Luft erfüllt war, nicht vernahm.

Unter den musikalischen Instrumenten hat wohl die Orgel den größten Umfang der Töne, insofern sie fast 10 Octaven umfaßt. Die neueren Pianos haben etwa 7 Octaven. Sie beginnen mit $A_2 = 27,5$ und gehen bis zu $C^V = 4224$ Schwingungen. Die Violine enthält, wenn man von den sogenannten Flageolettönen absieht, etwa 4 Octaven (198 — 3200 Schwingungen), der Contrabaß zwischen 40 und 175. Der höchste Ton des Orchesters ist wohl das d^V der Piccoloflöte von 4752 Schwingungen. Als äußerste Grenzen der menschlichen Stimme sind etwa 40 und 2100 Schwingungen anzusehen.

Vergleicht man das Ohr mit dem Auge in Bezug auf die Fähigkeit, Schwingungen von verschieden schneller Aufeinanderfolge wahrzunehmen, so zeigt es sich demselben bedeutend überlegen. Die von dem Auge wahrgenommenen Aethervibrationen umfassen nämlich wenig mehr als eine Octave.

12. Einfache und zusammengesetzte Klänge. Obertöne und Klangfarbe. Zusammensetzung einfacher Schwingungen zu verschiedenen periodischen Schwingungsformen. — Bereits bei der Beschreibung der Phonautographen haben wir erwähnt, daß zwar allen Klängen eine periodische Bewegung der Luft entspricht, dieselbe aber, wie aus der Form der aufgezeichneten Schwingungscurven hervorgeht, nur in wenigen Fällen eine einfach pendelartige wie bei der Stimmgabel ist. Damit im Zusammenhange steht eine an-

dere Erscheinung. Man bemerkt nämlich bei gehörig gerichteter Aufmerksamkeit mit bloßem Ohre, besser mit Hülfe der später zu beschreibenden Resonatoren, daß bei solchen Klängen, welche keine einfachen (Sinus-) Curven zeichnen, neben dem Grundtone, durch welchen die Höhe des Klanges bestimmt ist, eine Anzahl höherer Töne erklingt, die man, da sie höher liegen, *Obertöne* oder, weil sie die Bestandtheile des Klanges bilden, auch *Theiltöne* (Partialtöne) nennt. Dieselben bilden mit dem Grundtone immer ganz bestimmte Intervalle, die dadurch bestimmt sind, daß sie resp. 2, 3, 4, 5, 6 rc. mal so viele Schwingungen machen als der Grundton. Bezeichnet man den Grundton durch c, so sind es nach der Reihe also die Töne:

c′, g′, c″, e″, g″, ais″, c‴, d‴, f‴ rc.

oder in Notenschrift:



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

Man muß daher einfache und zusammengesetzte Klänge, oder nach Helmholtz „*Töne*“ und „*Klänge*“ unterscheiden.

Die Mathematik lehrt, daß solche periodische Curven wie die Schwingungscurven verschiedener Klänge, betrachtet werden können als entstanden durch Zusammensetzung einfacher Pendelcurven (vergl. Wellenlehre § 9), oder mit anderen Worten: daß man jede periodische Schwingung sich in eine Reihe einfacher Schwingungen zerlegt denken kann, deren Schwingungszahlen zu einander in demselben Verhältnisse stehen wie die des Grundtones zu seinen Obertönen; und daß diese Zerlegung nur auf eine Art möglich sei. Die Thatsache nun, daß wir im Stande sind, bei richtig gelenkter und fixirter Aufmerksamkeit die Theiltöne eines Klanges heraus zu hören, deutet darauf hin, daß unser Ohr diese Zerlegung einer zusammengesetzten periodischen Bewegung der Luft in ihre Elemente (d. h. einfache Pendelbewegungen) wirklich ausführt. Dieses ist schon i. J. 1835 von G. S. Ohm behauptet, aber erst in neuerer Zeit durch Helmholtz streng bewiesen worden und zwar sowohl auf analytischem als synthe-

tischem Wege. Er zeigte nämlich durch Zerlegung der Klänge, daß, wenn wir in einem Klange neben dem Grundton Obertöne hören, sich ihr Vorhandensein auch unabhängig von unserem Ohre durch gewisse mechanische Wirkungen, welche von ihnen hervorgerufen werden, nachweisen läßt, wir es also nicht mit einer subjectiven Empfindung zu thun haben; und umgekehrt, daß da, wo der Theorie nach gewisse Obertöne fehlen, wir sie weder hören noch auf andere Weise wahrnehmbar machen können. Endlich wies er direct durch den Versuch nach, daß sich eine Reihe einfacher Töne zu einem Klange vereinigen läßt und daß von der Anzahl der so verschmolzenen Töne der musikalische Character des Klanges, also die Klangfarbe abhängt.

13. Resonanz oder Mittönen. — Das hauptsächlichste Mittel, um die objective Existenz der Obertöne nachzuweisen, bietet die Resonanz oder das Mittönen. Oft kann man in einem Concertsaale die Beobachtung machen, daß durch die von den Instrumenten ausgehenden Luftschwingungen leichtbewegliche Gegenstände in Vibrationen versetzt werden. Man fühlt dieselben deutlich, wenn man ein Blatt Papier oder einen Hut zwischen den Fingern hält, hört sie bei gelockerten Fensterscheiben oder neben einander stehenden Gläsern, welche zuweilen laut klirren, namentlich wenn gewisse Töne angegeben werden. Es soll, glaubwürdigen Mittheilungen zufolge, Personen gegeben haben, welche im Stande waren, Gläser zu zersprengen, indem sie gewisse Töne kräftig hineinsangen oder vielmehr schrieen. Bringt man eine Flasche oder irgend einen hohlen Körper, der mit einer nicht zu weiten Oeffnung versehen ist, mit derselben in die Nähe des Ohres, so vernimmt man deutlich einen aus dem Innern kommenden Ton und zwar denselben, welcher durch Anblasen der Mündung erhalten werden kann.

Dieser Ton entsteht, indem die in der Flasche enthaltene Luftmasse durch die in der äußeren Luft, namentlich in geräuschvollen Städten, stets vorhandenen Schallwellen in Mitschwingung versetzt wird. Die meisten elastischen Körper können durch periodisch wiederkehrende Anstöße in pendelartige Schwingungen versetzt werden, selbst wenn jene Anstöße sehr schwach sind, falls

sie nur immer im richtigen Zeitmomente erfolgen, so daß sie die bereits vorhandene Bewegung verstärken. Ein naheliegendes Beispiel zur Erläuterung der Wirkung solcher Impulse bietet ein Uhrpendel, dessen Bewegung durch die schwachen Stöße, welche es bei jeder Schwingung von den Zähnen des Hemmungsrades erhält, unterhalten wird. Ja es ist beobachtet, daß, wenn von zwei an derselben Wand hängenden Uhren, deren Pendel genau dieselbe Schwingungsdauer besitzen, die eine in Gang gesetzt wird, der Pendel der andern allmählig durch Summirung der geringfügigen durch die Luft und durch die Wand übertragenen regelmäßig sich wiederholenden Impulse in so ausgiebige Schwingungen geräth, daß sie ebenfalls zu gehen beginnt. Aehnliches findet statt bei anderen pendelartig schwingenden Körpern z. B. dem Schwebebaume, der Hängeschaukel oder Glocken, welche letzteren auch selbst durch schwache Personen geläutet werden können, wenn dieselben ihre Kraft nur immer rechtzeitig, so daß sie zur Vermehrung der schon vorhandenen Bewegung beiträgt, anzuwenden wissen. Durch den folgenden, jederzeit leicht anzustellenden Versuch kann man sich jederzeit von der Richtigkeit des Gesagten überzeugen. Faßt man das obere Ende eines dünnen Fadens, an welchem ein schwerer Körper z. B. ein Ring hängt, zwischen Daumen und Zeigefinger, so kann man durch tactmäßige Bewegungen der Hand denselben leicht in starke Schwingungen versetzen, wenn man die Hand immer in dem Augenblicke etwas seitwärts verschiebt, in welchem er sich in der größten Entfernung von seiner Gleichgewichtslage befindet, jedoch so, daß die Abweichung von derselben stets vergrößert wird. Die stärkste Wirkung wird eintreten, wenn dieses nach jeder halben Schwingung geschieht; jedoch wird dasselbe, wenngleich in schwächerem Maße, auch dann erreicht, wenn man immer eine, oder zwei oder mehrere halbe Schwingungen ausläßt, die Impulse also z. B. nach Verlauf der Zeit $\frac{T}{2}$, $3\frac{T}{2}$, $5\frac{T}{2}$ u. s. w. oder nach $\frac{T}{2}$, $4\frac{T}{2}$, $7\frac{T}{2}$ 2c. ertheilt (wo unter T wie früher die Dauer einer ganzen Schwingung zu verstehen ist). Die Bewegungen der Hand

brauchen dabei übrigens nicht ruckweise vor sich zu gehen, sondern können auch continuirlich sein. Dann werden sie allerdings nicht immer beschleunigend, sondern zeitweise auch verlangsamend wirken. Indessen wird doch der Pendel allmählich stärker schwingen, wenn nur die beschleunigenden Wirkungen nicht ganz durch die verlangsamenden aufgehoben werden.

Macht die Hand irgend eine periodische Bewegung, so kann man sich dieselbe nach pag. 192 in eine Summe einfacher pendelartiger Schwingungen zerlegt denken. Ist unter diesen eine, deren Periode mit derjenigen des Pendels übereinstimmt, so wird das letztere allmählig in starke Schwingungen gerathen, sonst nicht. Es ist schon pag. 192 bemerkt, daß die erwähnte Zerlegung der periodischen Bewegung nur auf eine Weise geschehen kann. Es lassen sich also auch umgekehrt pendelartige Bewegungen der Hand von anderer Schwindungsdauer nicht zu einer periodischen Bewegung zusammensetzen, durch welche das Pendel in immer wachsende Schwingungen versetzt werden könnte.

In ganz ähnlicher Weise wie hier die Hand das Pendel, kann nun ein tönender Körper einen andern elastischen Körper in Mitschwingungen versetzen resp. zum Tönen bringen, wenn die Perioden beider eine derartige Uebereinstimmung besitzen, wie wir sie soeben besprochen haben. Es sind jedoch zwei wesentlich verschiedene Fälle zu unterscheiden: ob nämlich der elastische Körper, wie es in den obigen zur Veranschaulichung des Vorganges angeführten Beispielen der Fall war, im Stande ist, längere Zeit fortzutönen, wenn er einmal in Bewegung gesetzt ist, oder ob derselbe, etwa wie die dünne leicht bewegliche Membran des Phonautographen (oder auch das Trommelfell des Ohres) sehr bald zur Ruhe gelangt, wenn ihm nicht neue Impulse ertheilt werden. In dem ersten Falle wird er, selbst wenn er eine bedeutende Masse besitzt, durch wiederkehrende Anstöße zum Mittönen gebracht werden können, wenn die Periode derselben mit seiner eigenen Schwingungsperiode in der vorhin erklärten Weise übereinstimmt, aber auch nur in diesem Falle. So gelingt es leicht, eine über einen Resonanzboden gespannte Saite ins Tönen zu versetzen, wenn man ihren eigenen Ton in der Nähe

kräftig singt, oder sonst anhaltend hervorbringt. Die verstärkende Wirkung des Resonanzbodens, der aus einer breiten biegsamen Holzplatte besteht, beruht darauf, daß derselbe vermöge seiner verhältnißmäßig großen Oberfläche sehr geeignet ist, die Schwingungen der Luft aufzunehmen und umgekehrt zu übertragen. Ohne dieses Hülfsmittel würde man den Ton der Saite, auch wenn sie stark schwingt, nur schwach hören.

Aehnlich kann man auch Stimmgabeln zum Mittönen bringen, wenn man dieselben auf Resonanzkästen setzt. Letztere bestehen gewöhnlich aus länglichen rechteckigen Kästchen von Tannenholz, deren eines Ende offen ist und die einen Luftraum einschließen, dessen Eigenton mit demjenigen der Gabel genau übereinstimmt. Stellt man zwei solche Gabeln von genau gleicher Tonhöhe einander so gegenüber, daß sie sich ihre Mündungen zukehren, und streicht die eine mit einem Violinbogen, so geräth die andere selbst bei größerer Entfernung ins Tönen, wie man namentlich bemerkt, wenn man die erste mit dem Finger dämpft. In diesem und ähnlichen Fällen ist die genaue Uebereinstimmung der Perioden beider Körper unerläßlich; wenn man die eine der beiden Gabeln auch nur ein wenig z. B. durch Ankleben eines Wachskügelchens verstimmt, so bleibt die Wirkung aus.

Weniger wesentlich ist sie in dem zweiten Falle, wenn nämlich der mittönende Körper sehr bald nach dem Aufhören der Impulse zur Ruhe gelangt. Eine Membran kann also, wie wir beim Phonautographen gesehen haben, durch sehr verschiedene Töne in Mitschwingung versetzt werden. Die meisten elastischen Körper, und namentlich elastische Platten und Stäbe, besitzen nämlich mehrere, zuweilen sogar sehr viele Eigentöne, die nur in wenigen Fällen zum Grundtone harmonisch sind, und müssen daher auch sehr verschiedenartige Pendelschwingungen ausführen können. Am auffallendsten zeigt sich dieses bei elastischen Scheiben, bei welchen man die Verschiedenartigkeit der Schwingungen und ihre Vertheilung durch aufgestreuten Sand sichtbar machen kann. Befestigt man eine solche Scheibe an einem oder mehreren Punkten, streicht dann senkrecht gegen ihren Rand mit einem geharzten Cellobogen, so wird der Sand von den Stellen stärkster

Schwingung, den Schwingungsbäuchen, zu den ruhenden Stellen, den Knotenlinien, hingetrieben, wo er sich lagert und je nach der Höhe der hervorgebrachten Töne ein System von sehr verschiedenartig gestalteten krummen Linien, die „Chladni'schen Klangfiguren“ bildet. Wie in der Wellenlehre für eine elastische Schnur erläutert wurde, befinden sich auch bei einer Platte die zu beiden Seiten einer Knotenlinie liegenden Theile stets in entgegengesetztem Schwingungszustande.

Aehnliche Figuren entstehen auch, wenn man eine elastische Membran (thierische Blase, Kautschuckblatt, Papier) über einen Ring spannt, denselben horizontal hält und in der Nähe einen kräftigen Ton angibt. Namentlich beim Angeben des Grundtones der Membran sind die Schwingungen derselben sehr kräftig, da sie dann als Ganzes schwingt. In diesem Falle wird der Sand nach dem Rande geworfen. Bei Angabe höherer Eigentöne entstehen Knotenlinien, die bei einer kreisförmigen Membran die Form von concentrischen Kreisen und einem oder mehreren Durchmessern (die stets gleiche Winkel mit einander bilden) oder einer Combination beider zeigen. Bezeichnet man den Grundton einer solchen Membran durch c, so sind die den einfachsten Schwingungsformen entsprechenden Töne nach Helmholtz nahezu folgende:

c, as, cis, d′, g′, b′.

Es zeigt sich also durchaus kein so einfaches Verhältniß wie zwischen einem Grundtone und seinen harmonischen Obertönen.

Die Empfindlichkeit einer gespannten Membran für die Aufnahme von Schwingungen wird wesentlich erhöht, wenn man sie mit einem Luftraume in Verbindung setzt, also z. B. über eine Flasche mit abgesprengtem Boden an Stelle desselben spannt, wenngleich ihr Eigenton dadurch etwas verändert wird. Hält man eine solche Flasche horizontal, so daß die Membran eine vertikale Stellung hat und befestigt am Rande der Flasche ein leichtes Fadenpendelchen, welches sich beim ruhigen Herabhängen an die Membran anlegt, so zeigt dieses durch seine Bewegungen jede Schwingung der Membran an. Ein solcher Apparat, wie er dazu dient, das Vorhandensein gewisser Töne unabhängig vom

Ohre zu erweisen, ist auch sehr geeignet, die Wirkung des Trommelfelles im Ohre zu erläutern. Statt auf ein Pendelchen, kann man die Schwingungen der Membran, wie bereits erwähnt, auch auf eine Gasflamme übertragen und im Drehspiegel sichtbar machen.

Ein weit feineres Hülfsmittel zur Analyse von Klängen bieten die von Helmholtz angegebenen Resonatoren. Es sind dieses kugelförmige oder röhrenförmige Hohlkörper (von Glas, Metall, Pappe), welche auf der einen Seite, die dem tönenden Körper zugewendet wird, eine nicht zu weite Oeffnung haben, während sich auf der gegenüber stehenden Seite ein kurzer, spitz zulaufender Hals befindet; beim Gebrauche steckt man letzteren in den Gehörgang und verstopft das andere Ohr durch einen passenden Pfropfen von Wachs oder Sigellack. Man hört dann den Eigenton des Resonators sehr laut aus allen übrigen Tönen heraus, indem derselbe durch die mitschwingende Luftmasse im Innern desselben erheblich verstärkt wird. Nach den früheren Erläuterungen über die Ursachen des Mitschwingens steht zu erwarten und wird durch den Versuch bestätigt, daß man den Resonatorton, wenngleich schwächer, auch dann hören wird, wenn tiefere Töne angegeben werden, zu deren Obertönen der Eigenton des Resonators gehört. Man nennt solche Töne harmonische Untertöne. Ist der Resonatorton z. B. c″, so werden die harmonischen Untertöne sein:

c′, f, c, As, F, D, C ꝛc.

Auf ganz ähnliche Weise wie soeben erwähnt, entstehen auch, wie bereits früher angedeutet wurde, die Töne, welche man hört, wenn man irgend einen Hohlraum, z. B. die Mündung einer Flasche, ein Schneckengehäuse und dergleichen, in die Nähe des Ohres bringt. Ein interessantes Beispiel solcher Wirkung des Mitklingens führt Dr. Sebeck jun. an. Nach Angabe desselben hörte man bei Gelegenheit der Einzugsfeier des deutschen Heeres in die Kaiserstadt mitten in dem lärmenden Geräusche der Straßen aus den Kanonen, welche in langen Reihen die via triumphalis zierten, schöne tiefe glockenartige Klänge hervorschallen. Die Aehnlichkeit beider Klänge mag darin ihren Grund gehabt haben,

daß hier wie dort ganze Reihen von Nebentönen außer dem Grundtone gehört wurden.

Wie wir später sehen werden, spielt das Mittönen bei der Entstehung des Klanges der meisten Blasinstrumente, sowie der menschlichen Sprache eine wesentliche Rolle.

14. Schwingungen der Saiten. — Die Schwingungen der Saiten bieten, abgesehen davon, daß sie ein wichiiges Mittel zur Analyse der Klänge sind, ein besonderes Interesse, weil man ihre Bewegung theoretisch wie experimentell sehr genau nntersucht hat und weil sie sehr geeignet sind, das Verständniß vieler auf Tonschwingungen überhaupt bezüglichen Verhältnisse zu vermitteln. Um Versuche über dieselben anzustellen, bedient man sich gewöhnlich des Monochords. Der Haupttheil desselben ist ein länglich rechteckiger Resonanzkasten von ca. 1 Meter Länge und 0,1 Meter Breite und Tiefe, der in der Nähe der Enden auf seinem Deckel je einen festen Steg mit stählernen Wirbeln zum Aufspannen von Saiten trägt und der außerdem auf seiner ganzen Länge eine Theilung, z. B. eine Millimeterskala besitzt. Ferner gehören dazu noch einige kleine Stege mit Handgriffen, welche man an beliebigen Stellen unter die Saiten setzen kann und ein Stimmhammer zur Veränderung ihrer Spannung. Endlich kann man an vollkommeneren Monochorden einige der Saiten über Rollen leiten, um durch daran gehängte Wagschalen mit Gewichten die Spannungen zu messen.

Die Tonhöhe einer Saite, wenn dieselbe als Ganzes schwingt, hängt, abgesehen von der Spannung, von ihrer Länge und ihrem Gewichte ab. Bezeichnet man die Länge durch l, die Spannung durch s und ihr Gewicht durch p, die Schwingungsdauer durch T, so lehrt die von der Erfahrung bestätigte Theorie, daß man für zwei verschiedene Saiten die Proportion hat

$$T : T' = \sqrt{\frac{p\,l}{s}} : \sqrt{\frac{p'\,l'}{s'}}$$

Nun verhält sich bei zwei aus demselben Stoffe bestehenden Saiten

$$p' : p = d^2\,l : d'^2\,l',$$

wo d und d' die Durchmesser bezeichnen, mithin

$$T : T' = \frac{d\,l}{\sqrt{s}} : \frac{d'\,l'}{\sqrt{s'}}$$

Die Schwingungszeiten sind also direct proportional den Durchmessern und den Längen und umgekehrt proportional den Quadratwurzeln aus den Spannungen.

Gemäß dem soeben ausgesprochenen Gesetze erhält man bei einer Saite, deren Spannung und Durchmesser unverändert bleiben, die harmonischen Obertöne, wenn man dieselbe (vermittelst der beweglichen Stege) in solchen Punkten unterstützt, daß sich die Längen des tönenden Theiles verhalten wie

$$1 : \tfrac{1}{2} : \tfrac{1}{3} : \tfrac{1}{4} \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot : \frac{1}{n}$$

Schwingt die Saite als Ganzes, so hört man ihren Grundton, ist sie in der Mitte unterstützt, so hört man die Octave desselben. Ist der Steg bei $\frac{1}{3}$ untergesetzt, so gibt das kürzere Stück die Duodecime oder die Quinte der Octave, das längere folglich die Quinte des Grundtones u. s. f. Es ist zur Hervorbringung dieser Töne nicht nöthig, die Saite durch einen Steg zu unterstützen. Es genügt, die betreffenden Punkte derselben leise mit der Fingerspitze oder selbst mit einem Haarpinsel zu berühren. Die Saite zerfällt also beim Tönen in einzelne Abtheilungen, indem sich, ähnlich wie es in der Wellenlehre (§ 13) für die langsameren Schwingungen elastischer Schnüre erläutert ist, stehende Wellen bilden, welche einen Knotenpunkt an der berührten Stelle haben. So zerfällt, wenn man die Mitte der Saite berührt, dieselbe in zwei Abtheilungen, die stets entgegengesetzte Phase haben, und man hört die Octave; ebenso erhält man bei Berührung der Saite in $\frac{1}{3}$ ihrer Länge 3 Abtheilungen und man hört die Duodecime u. s. f. Am reinsten lassen sich diese Schwingungen hervorrufen, wenn man eine tönende Stimmgabel, die denselben Oberton gibt, welchen man hervorbringen will, mit ihrem Stiele auf den Resonanzboden setzt, über welchen die Saite gespannt ist.

In den so eben erwähnten Fällen, namentlich in dem letzteren gibt die Saite nur einen, der Zahl ihrer Abtheilungen entsprechenden Ton, während zugleich jedes ihrer Theilchen einfache

Pendelschwingungen ausführt. Ihre Form kann aber bei Beginn der Schwingung eine ganz beliebige, sogar unregelmäßige sein, wie z. B. wenn sie gezupft oder mit dem Bogen gestrichen wird. In diesem Falle ist die Bewegung jedes ihrer Punkte, wenngleich periodisch, doch nicht mehr einfach pendelartig. Man kann sie indessen nach dem Früheren in pendelartige Bewegungen, welche den oben erwähnten einfachen Schwingungsformen entsprechen, zerlegt denken, und die Saite wird daher in diesen Fällen nicht einen einfachen Ton, sondern neben dem Grundton auch noch Obertöne haben, die man sei es mit unbewaffnetem Ohre oder durch die uns bereits bekannten Mittel zur Analyse der Klänge wird nachweisen können.

Da die Analyse der Saitenklänge sich durch verhältnißmäßig einfache Versuche ausführen, andrerseits ihre Bewegung theoretisch sich vollständig bestimmen läßt, man namentlich auch weiß, unter welchen Bedingungen in ihrem Klange gewisse Obertöne vorhanden sind, so sind dieselben zur Vergleichung der Theorie mit der Praxis sehr geeignet, besonders zum Beweise des Satzes: daß, wo Obertöne vorhanden sind, man sie auch hört, während man im umgekehrten Falle sie weder mit bewaffnetem noch unbewaffnetem Ohre wahrnehmen noch sonst irgend wie ihr Vorhandensein nachweisen kann.

Zerlegung der Klänge, namentlich der Saitenklänge. — Man kann sich nun von der Existenz der Obertöne in dem Klange einer beliebig gezupften, geschlagenen oder gestrichenen Saite zunächst durch Mittönen auf folgende Weise leicht überzeugen. Befreit man die den Tönen c und c' entsprechenden Saiten eines Claviers durch allmäliges Herabdrücken der Tasten von ihrem Dämpfer, ohne sie jedoch wirklich anzuschlagen, zupft dann die Saite c an einer beliebigen Stelle, nur nicht grade in der Mitte, und dämpft darauf den Ton c durch Loslassen der Taste, so hört man den Ton c' nachklingen. Derselbe Versuch läßt sich auch mit anderen Obertönen von c, namentlich mit den nächstfolgenden g' und c'' 2c. mit gleichem Erfolge anstellen. Dieselben, auf diese Art objectiv nachgewiesenen Töne hört man aber auch zugleich durch passende Resonatoren

und, wenn man durch Uebung gelernt hat, die Aufmerksamkeit richtig zu lenken, oder bei besonderer persönlicher Anlage auch ohne dieselben, aus dem Klange der Saite heraus.

Der obige Versuch läßt insofern nicht ganz sichere Schlüsse zu, als wie wir gesehen haben, das Mittönen nicht nur durch denselben Ton, sondern auch, wenngleich schwächer, durch die harmonischen Untertöne desjenigen Tones hervorgerufen wird, welcher dem mittönenden Körper als Eigenton angehört. Der in dieser Beziehung noch übrig bleibende Zweifel wird nun durch folgendes Verfahren beseitigt. Zupft man eine Saite gerade in der Mitte, so müssen wie sich erwarten läßt und schon Thomas Young bewiesen hat, in ihrem Klange diejenigen Obertöne fehlen, welche hier ihren Knotenpunkt haben: also die erste und zweite Octave, überhaupt alle geradzahligen Obertöne, während die ungeradzahligen vorhanden sind. Ist also der Grundton der Saite *c*, so werden die Töne *c'*, *c''*, *g''* 2c. ausfallen, während *g'*, *e''* 2c. vorhanden sind. Dieses wird nun in der That durch den Versuch bestätigt. Die der Theorie nach fehlenden Töne lassen sich weder mit bloßem Ohre wahrnehmen, noch durch irgend eines der oben erwähnten Mittel nachweisen, während dieses bei den übrigen der Fall ist. Man kann sogar, ohne die Resonanz zu Hülfe zu nehmen, sich auf ganz objective Weise von dem Fehlen der geradzahligen Obertöne überzeugen, indem man die Saite, unmittelbar nachdem man sie in der Mitte gezupft hat, noch während des Tönens an derselben Stelle berührt. Sie schweigt dann sofort vollständig, während, wenn man sie nicht gerade in der Mitte gezupft hatte, diejenigen in dem Klange vorhandenen Obertöne nachklingen, welche in der Mitte einen Knotenpunkt haben. Ebenso kann man, indem man die Saite in $\frac{1}{3}$ ihrer Länge zupft, sich überzeugen, daß die ungeradzahligen Obertöne, welche hier einen Knotenpunkt haben, weder hörbar sind noch sich objectiv nachweisen lassen. Dieselben und ähnliche Versuche lassen sich selbstverständlich mit noch höheren Obertönen anstellen.

Es ist also damit der Satz Ohm's bewiesen, daß das Ohr einen zusammengesetzten Klang wirklich in seinen Theiltöne auflöst, was nach der mathematischen Anschauungsweise die Zer-

legung einer beliebigen periodischen Schwingung in die einfachen pendelartigen Schwingungen bedeutet, aus denen sie sich zusammensetzen läßt.

Da es außer den Saiten keinen tönenden Körper gibt, dessen Bewegung theoretisch so vollständig ermittelt ist und mit der Wirklichkeit verglichen werden kann, so läßt sich der obige Fundamentalsatz der Akustik durch anderweitige Versuche nicht so streng beweisen, sondern nur in einigen Punkten ergänzen. So kann man zeigen, daß bei einfach pendelartigen Schwingungen der Luft weder vom Ohre Obertöne gehört werden, noch sich objectiv nachweisen lassen.

Man erhält nach Helmholtz solche einfache Form der Luftbewegung, wenn man eine Stimmgabel nicht zu stark anschlägt und vor die Mündung einer auf denselben Ton abgestimmten Resonanzröhre hält. Statt der letzteren kann man einen gewöhnlichen Standcylinder nehmen, in den man so lange Wasser gießt bis man einen lauten Ton hört. Die Untersuchung des letzteren durch Resonatoren zeigt, daß derselbe in der That von keinem Obertone begleitet ist. Daß aber in diesen, wie in anderen Fällen auch das unbewaffnete Ohr keinen Oberton empfindet, den der Resonator nicht angibt, hat Helmholtz durch vielfältige Versuche, die er namentlich noch mit der Physharmonika und an der menschlichen Stimme anstellte, nachgewiesen. Daß man im umgekehrten Falle die Obertöne nicht immer mit unbewaffnetem Ohre hört, wo sie doch wie man weiß vorhanden sind, hat seinen Grund in einem allgemeinen physiologischen Gesetze, nach welchem wir uns unserer Empfindungen nur in soweit bewußt werden, als wir derselben zur Erkenntniß der Außenwelt bedürfen. Daß in der That viele Empfindungen unterhalb der Schwelle des Bewußtseins bleiben, also nicht zu Wahrnehmungen werden, lehren zahlreiche Erfahrungen. Wir nehmen es für gewöhnlich nicht wahr, daß alle Gegenstände, welche wir nicht gerade ansehen, uns doppelt erscheinen, also doch gesondert empfunden werden. Es gehört sogar eine besondere Uebung der Aufmerksamkeit dazu, diese Wahrnehmung zu machen, ähnlich wie für die der Obertöne. Umgekehrt sind wir gewöhnt, die

Einzelnempfindungen der beiden Augen bei denjenigen Gegenständen, welche wir gerade fixiren, zu einer einheitlichen Wahrnehmung zu verschmelzen, indem wir aus ihnen die Vorstellung eines Gegenstandes bilden. Daß dieses so sei, lehrt für das Auge das Stereoskop (vergl. Optik). Die Einzelnempfindungen gehen uns dabei keineswegs für unsere Wahrnehmung verloren, insofern wir nur durch ihre Combination zur Anschauung der Körperlichkeit eines Gegenstandes gelangen.

Auf ganz ähnliche Weise wie in dem angeführten Falle die beiden ursprünglich einzeln wahrgenommenen Bilder, verschmelzen Partialtöne eines Klanges z. B. der Violine zu einer einheitlichen Vorstellung. Während wir aber bei der Wahrnehmung durch das Auge die beiden Theilempfindungen trennen können, indem wir abwechselnd das eine oder das andere Auge schließen, ist dieses bei der Wahrnehmung der Klänge nicht so einfach auszuführen und gelingt uns namentlich auch deswegen nicht so leicht ohne anderweitige Hülfsmittel, weil wir für gewöhnlich kein Interesse haben die Zerlegung vorzunehmen. Es kann uns höchstens unter Umständen wünschenswerth erscheinen, aus dem Zusammenklange vieler Instrumente den Klang eines einzelnen herauszuhören, und hierin besitzen wir auch ziemliche Uebung, wenn wir denselben schon öfter isolirt gehört haben; es fällt uns aber nicht ein, eine noch weitergehende Analyse der Klangmasse zu versuchen. Da wir uns vielmehr von Jugend auf daran gewöhnt haben, die Theiltöne eines Klanges zu einem Ganzen zusammenzufassen, dieselben auch nicht so leicht zu sondern sind als die Theilklänge eines Orchesters, weil sie viel geringere Verschiedenheiten zeigen, so bedürfen wir, um dieselben wahrzunehmen besonderer Hülfsmittel, oder müssen uns besonders darauf einüben. Da wir aber, wie bemerkt, nur diejenigen Dinge wahrnehmen, auf welche wir aufmerksam sind, so kommt es dabei vor allem auf eine zweckmäßige Richtung der Aufmerksamkeit an. Zur Unterstützung derselben trägt es wesentlich bei, wenn man sich den Ton, welchen man als Oberton mit unbewaffnetem Ohre aus einem Klange heraushören will vorher isolirt, sei es durch einen passend abgestimmten Resonator, oder indem man ihn allein

auf einem Instrumente angiebt. Hat man sich erst einmal gewöhnt, auf die Obertöne zu achten, so hört man die stärkeren auch ohne weitere Hülfsmittel aus einem Klange heraus.

15. **Zusammensetzung der Klänge aus ihren Theiltönen.** — Wir haben bisher die Zerlegung der Klänge in ihre Theiltöne betrachtet. Es ist nun der Beweis des Ohm'schen Fundamentalsatzes insofern noch nicht vollständig, als noch nicht gezeigt ist, daß man einen Klang auch aus seinen Theiltönen zusammensetzen kann. Am einfachsten läßt sich eine solche Zusammensetzung vermittelst zweier angeblasenen Flaschen ausführen, deren Eigentöne im Verhältniß von Grundton und Octave stehen. Man bringt eine solche Flasche am besten dadurch zum Tönen, indem man durch ein am Ende breitgedrücktes Guttapercha-Rohr, welches man in passender Höhe an der Flasche befestigt, einen nahezu horizontalen Luftstrom gegen den Rand der Mündung leitet. Die Flasche gibt dann einen dumpfen Ton, der ziemlich frei von Obertönen ist. Bläst man nun beide Flaschen zugleich an, so hört man zuerst wohl noch ihre beiden Töne getrennt, (wie es auch oft nicht gelingt, die beiden zu einer stereoskopischen Zeichnung gehörigen Bilder zu vereinigen), bald aber verschmelzen sie zu einem Klange. Daß dabei die beiden vorher einzeln gehörten Töne in der Empfindung vorhanden sind und bei der Wahrnehmung des Klanges nicht ganz verloren gehen, folgt daraus, daß der letztere eine andere Klangfarbe besitzt, als der durch eine Flasche hervorgebrachte Ton. Während ein solcher nämlich *U*-ähnlich klingt, entsteht durch die Beimischung der Octave zum Grundton ein Klang, welcher mehr demjenigen des Vocales *O* zu vergleichen ist.

Viel vollkommener hat Helmholtz diese Zusammensetzung der einfachen Töne zu Klängen ausgeführt, indem er eine Reihe von flaschenähnlichen Resonanzröhren (welche statt des Halses indessen nur eine entsprechend enge kreisförmige Oeffnung hatten) durch vorgestellte Stimmgabeln zum Tönen brachte. Um dem Tone der Stimmgabeln dabei beliebige Dauer und gleichmäßige Stärke zu geben, benutzte er das Princip des Neef'schen Hammers. Er befestigte zu diesem Zwecke an den Zinken der magnetisirten Stimm-

gabeln, die sich zwischen den Polen eines kräftigen Electromagneten befanden, kleine umgebogene Metallspitzen, welche in Quecksilber tauchten. Ein electrischer Strom wurde nun zugleich durch den Electromagneten und die Zinken der Stimmgabel geleitet, so daß der Pol des Electromagneten der entgegengesetzte von dem ihm gegenüberstehenden Pole der Stimmgabel wurde. Letztere wurde in Folge dessen so kräftig angezogen, daß die an ihr befestigte Spitze aus dem Quecksilber heraustauchte und so der Strom unterbrochen wurde. Indem nun die Zinken in Folge ihrer Elasticität zurückgingen, wurde der Strom wieder hergestellt u. s. f. Durch eine einzige solcher Unterbrechungsgabeln kann nach dem bei der Erklärung des Mittönes Gesagten eine ganze Reihe von Gabeln, welche den harmonischen Obertönen der ersteren entsprechen in dauernde Schwingungen versetzt werden, wenn man sie ebenfalls magnetisirt und zwischen die Pole von Electromagneten bringt, die von demselben Strome umflossen sind, wie die ursprüngliche Unterbrechungsgabel. Um dem Ton der einzelnen Resonanzröhren beliebig dämpfen oder verstärken zu können, brachte Helmholtz kreisförmige Deckplatten vor die Oeffnung derselben, die an Hebeln befestigt waren und sich seitlich verschoben, wenn eine mit dem Hebel in Verbindung stehende Taste niedergedrückt wurde. Sämmtliche Tasten waren zu einer Art Claviatur vereinigt. Die Stimmgabeln selbst waren auf starken Brettern mit untergeklebten Gummiröhren befestigt, so daß man ihren Ton, wenn die Oeffnung der verstärkenden Resonanzröhre verschlossen war, kaum hörte. So konnte er die Stärke jeden Tones modificiren und beliebig viele einfache Töne aus der pag. 232 aufgeführten Reihe combiniren.

Mit dem vorstehend beschriebenen Apparate gelang es nun Helmholtz, verschiedene zusammengesetzte Klänge nachzubilden und ferner den Nachweis zu führen: daß die Klangfarbe nur von der Zahl und Stärke der Obertöne, welche den Grundton begleiten, abhängig ist, gleichviel ob die Phasen derselben übereinstimmen oder nicht. Es bezieht sich dieser Nachweis selbstverständlich nur auf den musikalischen Theil der Klänge. Von den sonstigen Eigenthümlichkeiten,

durch welche sich die Klänge verschiedener Instrumente unterscheiden ist hierbei abzusehen.

Unter den Klängen, welche sich auf diese Art durch Stimmgabeln und Resonanzröhren nachbilden lassen, sind besonders die Vocalklänge zu erwähnen, doch werden wir diesen Gegenstand passend erst später besprechen können.

Wirkungsweise des Ohres. — Da eine eingehende Beschreibung des Ohres ohne Abbildungen nicht wohl möglich, für unsern Zweck auch nicht gerade erforderlich ist, so beschränken wir uns darauf, die verschiedenen Theile desselben hauptsächlich ihrer akustischen Wirkung nach, so weit dieselbe durch die neueren Untersuchungen namentlich von Helmholtz erforscht ist, zu besprechen. Wir haben bereits früher erwähnt, daß die von dem Trommelfell aufgenommenen Schwingungen der Luft durch die mit demselben verbundenen Gehörknöchelchen auf das innere Ohr übertragen werden. Zunächst hinter dem Trommelfell liegt eine mit Luft ausgefüllte Höhlung, die Paukenhöhle, aus welcher ein schmaler Gang, die eustachische Trompete oder Tuba nach dem Schlunde führt. Man kann durch die Tuba Luft in die Trommelhöhle treiben, wenn man die Luft im Munde zusammenpreßt, und umgekehrt dieselbe durch eine Schlingbewegung daraus entfernen, wobei man jedesmal ein Knacken hört. In der nach dem Kopfe zugekehrten Wandung der Paukenhöhle befinden sich zwei, ebenfalls durch Membranen verschlossene Oeffnungen: das ovale und das runde Fenster, mit deren ersterem das letzte der Gehörknöchelchen, der Steigbügel, fest an seiner Basis verwachsen ist. Hinter demselben, in der Tiefe des Felsenbeines, befindet sich nun der Haupttheil des Ohres, in welchem die Gehörnerven ausgebreitet sind: das Labyrinth, dessen Haupttheile der Vorhof, die Bogengänge und die Schnecke sind. Der Vorhof liegt an dem ovalen Fenster, die Schnecke steht mit dem runden Fenster in Verbindung. Alle inneren Höhlungen des Labyrinthes sind mit Wasser angefüllt und communiciren unter einander. In dem Wasser schwimmen die mit den Nerven in Verbindung stehenden häutigen Theile. In dem Vorhofe finden sich an den Häuten steife Härchen und kleine krystallinische Kör-

perchen (Gehörsand), welche dazu bestimmt zu sein scheinen, die dem ovalen Fenster mitgetheilten Schwingungen auf die Nerven zu übertragen. Der für die Auffassung der Klänge wichtigste Theil scheint die Schnecke zu sein. Die Innere derselbe stellt einen gewundenen Gang dar, der seiner ganzen Länge nach durch zwei in der Mitte seiner Höhe ausgespannte Membranen in drei Abtheilungen: eine obere, mittlere und untere geschieden ist. Nur am Ende der Membran befindet sich eine kleine Oeffnung in derselben, durch welche die obere und untere Abtheilung mit einander communiciren. In der mittleren Abtheilung befinden sich fast unzählige mikroskopisch kleine Plättchen und Fädchen, die Corti'schen Fasern, welche an ihrem einen Ende mit den Fasern des Gehörnervs in Verbindung stehen, an dem andern der ausgespannten Membran anhängen. Man unterscheidet unter diesen Corti'schen Fasern solche erster und zweiter Ordnung. Die ersteren bilden (nach der Ansicht von Helmholtz) einen elastischen Steg der mit seiner Basis am Rande der Membran aufsitzt, während sein emporgerichtetes Ende durch die Fasern zweiter Ordnung — biegsame cylinderische Fäden, deren untere Enden wieder an der Membran befestigt sind — niedergezogen wird. Die Fasern zweiter Ordnung werden so gespannt erhalten und um so leichter in Schwingungen versetzt werden können, als sie gerade in der Mitte der Membran, also da wo diese die stärksten Bewegungen macht, mit ihren unteren Enden verwachsen sind, „wie auch eine Saite in starke Schwingungen geräth, wenn ihr eines Ende mit einem schwingenden Körper, z. B. einer Stimmgabel, verbunden ist, namentlich dann, wenn sie unisono mit dem Tone gestimmt ist, der ihr zugeleitet wird". Es ist nun nach Helmholtz sehr wahrscheinlich, daß während die in dem übrigen Theile des Ohres mit den Enden der Nerven in Verbindung stehenden Gebilde, die Gehörsteinchen und Härchen, die ihrer ganzen Construction nach wohl geeignet sind, einzelnen Stößen nachzugeben und diese auf die Nerven zu übertragen, bei der Wahrnehmung von Knallen und Geräuschen wirksam sind, durch die Corti'schen Fasern die Wahrnehmung musikalischer Klänge vermittelt wird. Es muß nach ihrer ganzen Construction ange-

nommen werden, daß sie in regelmäßiger Stufenfolge auf gewisse Töne abgestimmt sind und demnach durch die Einwirkung von Tönen, deren Periode mit ihrer eigenen übereinstimmt in Mitschwingung versetzt werden können. Nach dieser Annahme ergiebt sich die Zerlegung der Klänge durch das Ohr wie eine ganz natürliche und nothwendige Folge. Der Vorgang ist dann demjenigen ganz analog welchen man an jedem Claviere beobachten kann. Befreit man die Saiten einer solchen von dem Dämpfer und gibt irgend einen Klang kräftig an, so gerathen, wie wir wissen, alle die Saiten in Mitschwingungen, deren Eigentöne den Theiltönen des Klanges entsprechen. Dasselbe muß mit den Corti'schen Fasern der Fall sein. Wir werden demnach so viele Töne unterscheiden können als Corti'sche Fasern vorhanden sind. Nach der Schätzung Kölliker's beträgt die Zahl derselben beim menschlichen Ohre etwa 3000, von denen 2800 auf die sieben Octaven der musikalischen Instrumente, also 400 auf jede Octave, 33 auf jeden Ton derselben kommen, was ausreicht um auch noch sehr kleine Theile eines solchen zu unterscheiden. Allerdings sollen nach Weber's Untersuchung geübte Musiker noch Unterschiede in der Tonhöhe von einer Schwingung auf tausend wahrnehmen können, was einem ToninterValle von etwa $\frac{1}{64}$ eines halben Tones entspricht; darin liegt aber kein Hinderniß für die obige Annahme, insofern in dem Falle, wo ein Ton nicht mit dem Eigentone einer Corti'schen Faser übereinstimmt, die beiden Fasern, zwischen denen er liegt, in Mitschwingungen gerathen werden, und zwar diejenige von beiden stärker, deren Schwingungsperiode der des angegebenen Tones näher liegt. Die Auffassung sehr kleiner Unterschiede der Tonhöhe würde demnach auf der Fähigkeit, sehr nahe gleiche Nervenerregungen unterscheiden zu können, beruhen. So ist es auch erklärlich, daß bei continuirlichem Steigen der Höhe eines Tones, wie wir es z. B. hervorbringen können, wenn wir die Spannung einer Saite während sie tönt, allmälig verstärken, keine Discontinuität der Empfindung entsteht, während ein scalenartiges Aufsteigen des Tones wahrgenommen werden müßte, wenn nur immer eine Corti'sche Faser in Mitschwingung versetzt werden könnte.

Die obige Hypothese, durch welche also die qualitative Verschiedenheit der einzelnen Schallempfindungen auf die Erregung verschiedener Nervenfasern zurückgeführt wird, gewinnt um so mehr an Wahrscheinlichkeit, als sich auch die Verschiedenheit der Farbenempfindung nach einer ganz ähnlichen, von Thomas Young aufgestellten und von Helmholtz adoptirten Hypothese erklären läßt, beide Hypothesen aber Consequenzen, gewissermaßen specielle Fälle eines allgemeinen schon im Jahre 1826 von Johannes Müller aufgestellten und durch alle neueren Forschungen bestätigten physiologischen Gesetzes sind, nach welchem der Unterschied der Empfindungen verschiedener Sinne nicht abhängig ist von den äußeren Einwirkungen welche die Empfindung erregen, sondern von den verschiedenen Nervenapparaten, welche sie aufnehmen (vergl. pag. 208). „Man hat die Nerven vielfach nicht unpassend mit Telegraphendrähten verglichen. Ein solcher Draht leitet immer nur dieselbe Art electrischen Stromes, der bald stärker, bald schwächer oder auch entgegengesetzt gerichtet sein kann, aber sonst keine qualitativen Unterschiede zeigt. Demnach kann man, je nachdem man seine Enden mit verschiedenen Apparaten in Verbindung setzt, telegraphische Depeschen geben, Glocken läuten, Minen entzünden, Wasser zersetzen, Magnete bewegen, Eisen magnetisieren, Licht entwickeln &c. Aehnlich in den Nerven. Der Zustand der Reizung, der in ihnen hervorgerufen worden, und von ihnen fortgeleitet wird, ist, soweit er sich an der isolirten Nervenfaser erkennen läßt, überall derselbe, aber nach verschiedenen Stellen theils des Gehirns, theils der äußeren Theile des Körpers hingeleitet, bringt er Bewegungen hervor, Absonderungen von Drüsen, Ab- und Zunahme der Blutmenge, der Röthe und der Wärme einzelner Organe, dann wieder Lichtempfindungen, Gehörempfindungen &c. Wenn jede qualitativ verschiedene Wirkung der Art in verschiedenartigen Organen hervorgebracht wird, zu denen auch gesonderte Nervenfasern hingehen müssen, so kann der Vorgang der Reizung in den Fasern ganz derselbe sein, wie der electrische Strom in den Telegraphendrähten immer derselbe ist, was für verschieden-

artige Wirkungen er auch an den Enden hervorbringen möge.“ (Helmholtz.)

Es möge noch hinzugefügt werden, daß die Helmholtz’sche Hypothese über die Wirksamkeit der Corti’schen Fasern gewissermaßen eine directe Bestätigung durch die Untersuchungen von V. Hensen über das Gehör der Krebse erhalten hat*. Der genannte Forscher brachte Exemplare der Gattung Mysis und Palaemon in Meerwasser, dem er etwas Strychnin zugesetzt hatte, um die Reizbarkeit der Nerven zu erhöhen. Die Thiere geriethen beim leisesten Geräusche in Zuckungen und es zeigte sich nun unter dem Mikroskope, daß die Gehörempfindung bei ihnen hauptsächlich durch gewisse Härchen vermittelt wird, und daß von diesen immer einzelne in starke Vibration geriethen, je nach der Höhe der angegebenen Klänge. Zur Hervorbringung der letzteren wurde ein Klapphorn benutzt.

Die Erscheinung ferner, daß einzelne namentlich sehr hohe Töne von manchen Personen gar nicht gehört werden, läßt sich einfach aus der Helmholtz’schen Hypothese durch die Annahme erklären, daß die denselben entsprechenden Fasern entweder nicht vorhanden oder irgendwie, z. B. durch Verhärtung der betreffenden Theile am Vibriren verhindert sind. Ebenso erklärt sich die Erscheinung, daß manche Ohrenkranke nur periodische Töne vernehmen.

Im Allgemeinen bemerken wir noch, daß wenn das Trommelfell durchbohrt ist, man nur verworren hört, daß dagegen vollständige Taubheit eintritt, wenn der Gehörnerv gelähmt ist. Die Richtung aus welcher der Schall kommt, läßt sich nur dann mit einiger Sicherheit beurtheilen, wenn man mit beiden Ohren zugleich hört. Verstopft man ein Ohr, so scheinen alle Töne von der Seite des anderen herzukommen.

17. Betrachtung einzelner Klänge. — Im Vorhergehenden haben wir die Klänge nur im Allgemeinen betrachtet, und sind auf besondere Klänge, wie die der Saiten, nur eingegangen, um ihre Zusammensetzung aus einfacheren Bestand-

---

* Vergl. Radau, Lehre vom Schall, pag. 314 und 315.

theilen, den Theiltönen nachzuweisen und daran anknüpfend, die Einrichtung des Ohres, insofern sie mit seiner thatsächlich vorhandenen Fähigkeit, zusammengesetzte Klänge in ihre Elemente aufzulösen, zusammenhing, zu erläutern. Indem wir nunmehr zur speciellen Besprechung verschiedener Klänge übergehen, werden wir betrachten:

1. Die einfachen Klänge, ohne Obertöne,
2. Die Klänge mit Obertönen und unter diesen
   a. solche mit harmonischen Obertönen,
   b. solche mit unharmonischen Obertönen.

Zu den unter 2a genannten gehören die eigentlichen musikalischen Klänge.

Da ferner, wie wir bei den Klängen der Saiten gesehen haben, die Zahl und Stärke der Obertöne, abgesehen von der sonstigen Beschaffenheit des tönenden Körpers, wesentlich von der Art, wie die Klänge hervorgebracht werden, abhängt, so haben wir zunächst die verschiedenen Erregungsarten der Klänge zu erwähnen.

Man kann einen Klang erregen 1. durch einen kurz andauernden Impuls, also einen Schlag oder Zug, der auf bestimmte Punkte des elastischen Körpers wirkt. Beispiele: Glas- und Stahlharmonika, Clavier, Cither; 2. durch Reiben oder Streichen, wobei sich, wie wir sehen werden, einzelne Impulse rhythmisch wiederholen. Beispiele: Alle Streichinstrumente; 3. durch Blasen gegen einem scharfen Rand. Beispiele: Lippenpfeifen; 4. durch Blasen gegen elastische Zungen. Beispiele: Zungenpfeifen, menschliche Stimme; 5. durch Mittönen. Diese letztere Art der Klangerregung haben wir schon bei der Analyse der Klänge besprochen, und werden sie daher im Folgenden nur insoweit erwähnen, als die Entstehung einzelner Klänge damit zusammenhängt.

Einfache Klänge. — Die Zahl der Klänge ohne Obertöne ist sehr gering. Sie werden am meisten, wie schon erwähnt ist, durch eine Stimmgabel hervorgebracht, die man entweder vor die Mündung einer mit ihrem Grundtone gleichgestimmten Resonanzröhre bringt, oder mit dem Stiele auf eine Saite z. B.

des Monochords, setzt und denselben so lange nach dem Stege hin verschiebt, bis die Saite kräftig tönt. Es geschieht dieses dann, wenn einer der Eigentöne des Saitenstückes zwischen dem aufgesetzten Stiele und dem Stege gleich dem Stimmgabeltone ist. Da in diesem Falle indessen höhere harmonische Obertöne die Gabel ebenfalls zum Mittönen bringen können, so muß man, um dieses zu verhindern, die Saite in einem Punkte etwas belasten, z. B. durch ein Tröpfchen Siegellack.

Auch die Töne, welche man erhält, wenn man eine bauchige Flasche anbläst (vergl. oben pag. 245) sind, wie ebenfalls schon bemerkt wurde, einfach und nur von Luftgeräusch begleitet. Damit ist die Aufzählung derselben aber auch erschöpft.

Einfache Töne können (nach §. 12) nur Unterschiede der Höhe und Stärke, aber nicht der Klangfarbe zeigen. Sie klingen ungemein weich und sind frei von allem Scharfen und Rauhen, wie auch die Form ihrer Schwingungscurve für das Auge denselben Charakter zeigt. Dafür erscheint ihr Klang aber auch leer und in den tiefern Lagen namentlich sehr dumpf, wodurch der Eindruck größerer Tiefe hervorgebracht wird.

Klänge mit harmonischen Obertönen. — Zu diesen gehören in erster Linie die Klänge der Saiten und die ihnen in mancher Beziehung ähnlichen Klänge tönender Luftsäulen, sodann die, in der Musik allerdings nicht benutzten Klänge longitudinal schwingender Stäbe.

Saitenklänge. — Wir haben in §. 14 gesehen, daß die Saiten je nach der Art ihrer Erregung einfache pendelartige oder complicirtere periodische Schwingungen ausführen können, und daß sie demnach einfache Töne oder zuweilen sehr zusammengesetzte Klänge geben können. Die Zahl der Obertöne hängt aber außerdem noch von der Dicke, Steifigkeit und Elasticität der Saiten ab.

Wird eine Saite durch Reißen, sei es mit dem Finger oder mit einem Stifte oder durch Anschlagen mit einem Hammer oder Streichen mit einem Bogen erregt, so ist, wie sich erwarten läßt, ihr Klang ein sehr zusammengesetzter, da nach dem Früheren (vergl. auch Wellenlehre §. 9) die Zahl der Obertöne um so

größer wird, je discontinuirlicher die Bewegung ist, d. h. je plötzlicher die Vibrationsgeschwindigkeit wechselt. Solche plötzlichen Sprünge geben sich in den entsprechenden Schwingungscurven durch scharfe Krümmungen und Ecken kund. Ein Beispiel einer derartigen Bewegung ist die eines Hammers, welcher durch eine Daumenwelle allmälig gehoben wird und dann plötzlich herabfällt. Die von einem solchen gezeichnete Curve wird bei dem Punkte in welchem das Herabfallen stattfand eine plötzliche Umbiegung zeigen, so daß sie fast einer Reihe von m-Strichen gleicht. Eine solche Curve ließe sich aber nur aus unzählig vielen einfachen Sinuscurven zusammensetzen. Ganz ähnlich der soeben beschriebenen Bewegung eines Hammers ist die einer Violinsaite, welche mit einem Bogen gestrichen wird, wie auch diejenige aufschlagender Zungen (vergl. weiter unten).

Ist der Ton einer Saite ein einfacher, wie bei der Erregung durch eine Stimmgabel, so macht nicht nur jedes ihrer Theilchen eine einfache Pendelbewegung, sondern auch die Form der Saite selbst, die dabei durch Knotenpunkte in gleiche Abtheilungen von einfacher regelmäßiger Krümmung zerfällt, ist derjenigen einer Pendelcurve ähnlich. Zieht man sie aber mit einem Stifte zur Seite, so bildet sich eine scharfe Ecke, welche während des Tönens der Saite nicht verschwindet, sondern gewissermaßen zwischen den Befestigungspunkten hin- und herläuft. Da hiernach die Bewegung jedes Punktes eine sehr discontinuirliche, gleichsam springende ist, so läßt sich von vornherein schließen, daß der entstandene Klang aus einer langen Reihe von Theiltönen zusammengesetzt sein muß. In der That beruht das eigenthümliche Klimpern solcher Klänge wie z. B. der Citherklänge auf sehr hohen Obertönen, welche (nach pag. 232) zum Grundtone nicht mehr harmonisch sind. Aehnlich ist es, wenn man eine Saite mit einem scharfkantigen Hammer oder Stifte schlägt, wie es bei der alten Form des Clavieres, dem Spinett der Fall war. Ist dagegen der Hammer weich und elastisch, wie bei den neueren Clavieren, so ist die Umbiegung der Saite nicht so plötzlich und demnach auch die Zahl der Obertöne nicht so groß. Die Theorie ergibt, daß in diesem Falle diejenigen Obertöne besonders be-

günstigt werden, deren halbe Schwingungsdauer der Zeit gleich ist, während welcher der Hammer der Saite anliegt. Je länger diese ist, desto tiefer werden also die mitklingenden Obertöne sein.

Die Stelle des Anschlages übt insofern einen bedeutenden Einfluß aus, als in dem entstehenden Klange diejenigen Obertöne fehlen, welche an derselben Stelle ihren Knotenpunkt haben, während, wie sich erwarten läßt, diejenigen am stärksten sind, deren Schwingungsbäuche der Anschlagsstelle nahe liegen. Wird die Saite z. B. in der Mitte angeschlagen, so fallen nach pag. 242 in ihrem Klange alle geradzahligen Obertöne (Octave, zweite Octave ꝛc.) fort, wodurch der Klang eigenthümlich hohl und näselnd wird. Die Erfahrung hat gelehrt, daß man in den mittleren Tonlagen die schönste Klangfarbe erhält, wenn sich die Anschlagsstelle zwischen $\frac{1}{7}$ und $\frac{1}{9}$ befindet; und hier liegt sie in der That bei den besseren Instrumenten. Die akustische Untersuchung zeigt nun, daß in diesem Falle der 7. und 9. Partialton fortfällt. Dieses sind aber die ersten unharmonischen Töne, während die übrigen, bis zum 8. inclusive zum Grundtone harmonisch sind (der letztere fehlt hier wegen der Anschlagsstelle). Will man bewirken, daß der Grundton der Saite über die Obertöne überwiegt, so muß dieselbe mit einem schweren aber weichen Hammer geschlagen werden. Das Material der Saite übt auf die Klangfarbe insofern Einfluß aus, als durch Steifigkeit die Bildung hoher Obertöne verhindert wird. Dagegen kann man mit feinem biegsamen Draht viele Obertöne hervorrufen. So gelang es Helmholtz bei einer aus feinstem Blumendraht gefertigten Saite von 700^{cm} Länge noch den 28. Ton isolirt hervorzubringen. Darmsaiten geben bei gleicher Spannung und gleichem Durchmesser wegen ihres geringen Gewichtes nach §. 14 höhere Töne als Metallsaiten. Da sie außerdem nicht so elastisch sind, so werden ihre höheren Töne schneller gedämpft und deshalb wohl hauptsächlich erscheinen die Klänge der Harfe und Guitarre, bei denen solche Saiten benutzt werden, weniger klimpernd.

Von der bisher besprochenen wesentlich verschieden ist die Erregungsweise der Saiten durch Streichen mit einem Bogen. Die dann stattfindende Bewegung der Saite wurde schon ange-

deutet und läßt sich leicht erklären. Durch den geharzten Bogen wird sie zur Saite gezogen, bis ihre Spannung im Stande ist die Adhäsion an die Haare zu überwinden und sie zurückspringt. Derselbe Vorgang, welcher beiläufig bei jeder Reibung ein ähnlicher ist, wiederholt sich rhythmisch, und so entsteht ein Klang, der nach dem Vorhergehenden reich an Obertönen sein wird. Die Analyse desselben ergibt, daß der Grundton hier verhältnißmäßig kräftiger ist, als bei geschlagenen oder gerissenen Saiten; die ersten Obertöne schwächer, die höheren (vom 6. bis 10. etwa) viel deutlicher. Die letzteren verursachen also die Schärfe des Klanges der Streichinstrumente. Uebrigens ist hier die Stelle, wo die Saite gestrichen wird, nicht so wesentlich für den Gehalt an Obertönen als im ersten Falle die Stelle des Anschlages.

Tönende Luftsäulen. — a. Flötenpfeifen. Die tönenden Luftsäulen, auf welchen hauptsächlich der Klang sämmtlicher Blasinstrumente beruht, sind insofern den Saiten ähnlich, als sich bei ihnen wie bei diesen leicht Knoten bilden und ihre Klänge daher harmonische Obertöne enthalten können. Bei allen Blasinstrumenten wird der Klang durch ein besonderes Mundstück erregt.

Die einfachsten und bekanntesten Blasinstrumente, bei denen die Luftsäule von einem geraden meistens cylindrischen Rohre umschlossen ist, sind die Pfeifen. Sie sind entweder offen oder gedeckt (gedackt). Die offenen Pfeifen können alle harmonischen Obertöne enthalten, die gedeckten dagegen, ähnlich wie die in der Mitte gezupften Saiten nur die ungeradzahligen. Weite gedeckte Pfeifen geben, wie bauchige Flaschen, den Grundton fast rein, während man ihn bei langen engen Pfeifen verhältnißmäßig schwer erhält. Bei kräftigem Anblasen namentlich springt hier der Ton leicht in die höhere Octave über. Bei manchen Blasinstrumenten benutzt man fast nur die höheren Obertöne, so beim Waldhorn. In den Windungen desselben ist eine bis 27 Fuß lange Luftsäule eingeschlossen, deren Grundton sehr tief ist. Die höheren Obertöne, vom 8. ab bilden nach §. 12 nahezu eine Tonleiter und lassen sich nach Bedürfniß durch Einlegen der Hand in den am Ende befindlichen Schallbecher etwas verändern.

Bei den gedeckten Pfeifen befindet sich am geschlossenen Ende stets ein Schwingungsknoten, da hier nach §. 12,a der Wellenlehre aus einem die Wand treffenden Berge ein reflectirtes Thal von genau derselben Tiefe entsteht und umgekehrt, die Bewegungen sich also vernichten. Da die Schwingungsknoten ferner stets um eine halbe Wellenlänge von einander abstehen, so müssen also (wenn wir die Wellenlänge wie früher durch l bezeichnen) dieselben um

$$0, \frac{l}{2}, \frac{2l}{2}, \frac{3l}{2}, \frac{4l}{2} \text{ u. s. f.}$$

vom geschlossenen Ende entfernt liegen, während die Schwingungsbäuche, welche stets in der Mitte zwischen zwei Schwingungsknoten liegen, die Abstände

$$\frac{l}{4}, \frac{3l}{4}, \frac{5l}{4}, \frac{7l}{4} \text{ u. s. f.}$$

vom Ende haben. In den Schwingungsknoten, zu deren beiden Seiten die Luft sich stets in entgegengesetzter Richtung bewegt, findet der größte Wechsel der Dichtigkeit, aber die geringste Bewegung statt, während umgekehrt in den Schwingungsbäuchen die Veränderung der Dichtigkeit ihr Minimum, die Bewegung ihr Maximum erreicht. Wir haben früher gesehen, daß man eine geschlossene Luftsäule durch eine an ihre Mündung gehaltene Stimmgabel zum Tönen bringen kann. Dieses geschieht aber offenbar nur wenn sich die Gabel in einem Schwingungsbauche befindet. Hiernach können gedeckte Pfeifen durch Erregung an ihrem offnen Ende nur dann zum Tönen gebracht werden, wenn ihre Längen betragen $\frac{l}{4}$ oder $\frac{3l}{4}$ oder $\frac{5l}{4}$ ꝛc.

Auch bei offenen Pfeifen findet an den Enden eine wenngleich unvollkommene Reflection der Schallwellen an der äußeren Luft statt, und zwar erfahrungsmäßig so, als ob eine Viertelwelle hinter dem Ende des Rohres eine feste Wand vorhanden wäre. Demgemäß würde sich dort ein Schwingungsknoten, am Ende der Röhre selbst aber ein Schwingungsbauch befinden und

ebenso in den Entfernungen $\frac{l}{4}$, $\frac{2l}{2}$, $\frac{3l}{2}$ ꝛc. vom Ende, während die Schwingungsknoten in diesem Falle in den Entfernungen $\frac{l}{4}$, $\frac{3l}{4}$, $\frac{5l}{4}$ ꝛc. vom Ende liegen. Durch die erstern Umstände sind zugleich die Längen der offenen Pfeifen bestimmt.

Aus dem Obigen folgt, daß eine offene Pfeife wenn sie einen Ton von derselben Wellenlänge l hervorbringen soll wie eine gedeckte, die doppelte Länge haben muß.

Lippenpfeifen. — Die Erregung des Tones findet bei dieser Art von Pfeifen ähnlich wie bei angeblasenen Flaschen dadurch statt, daß man einen Luftstrom gegen einen scharfen Rand (die Lippe) leitet. Dadurch entsteht ein sausendes oder zischendes Geräusch, welches nach dem Früheren (§. 8) als ein Gemisch vieler Töne betrachtet werden kann, von denen diejenigen, welche den Eigentönen der in der Pfeife eingeschlossenen Luftsäule entsprechen, dieselbe zum Mittönen erregen. Die Eigentöne sind bei engen cylindrischen offenen Pfeifen den Obertönen genau entsprechend und hier hört man sie bis etwa zum 6. deutlich. Sie verleihen dem Klange eine gewisse Aehnlichkeit mit dem einer Geige. Bei den weiteren offenen Pfeifen sind die Eigentöne alle etwas höher, als die entsprechenden harmonischen Obertöne des Grundtones und werden daher viel weniger durch Resonanz verstärkt. Solche weiten Pfeifen, welche also hauptsächlich den Grundton stark und voll angeben, daneben auch wohl schwach die Octave und Duodezime, bilden die Prinzipalstimmen der Orgel. Ihre Klangfarbe ist viel weicher als die der oben erwähnten Geigenprincipale.

Noch reiner als die offenen geben weite gedeckte Pfeifen den Grundton, weil bei ihnen die Eigentöne noch mehr nach der Höhe hin abweichen. Engere lassen neben dem Grundtone merklich die Quinte hören und heißen deshalb Quintaten. Eine eigenthümliche Art von Lippenpfeifen sind die Rohrflöten. Bei diesen ist nämlich in den Deckel ein beiderseits offenes Röhrchen eingesetzt, welches nach der Untersuchung von Helmholtz als Eigenton den 5. Theilton des Grundtones giebt. Dadurch wird

dieser besonders verstärkt und der Klang der Pfeife ist ein sehr heller.*)

Besonders zu erwähnen als lehrreich für die Entstehung der Klänge sind die Mixturregister. Diese sind nämlich durch Verbindung mehrerer Pfeifen gebildet, welche zugleich ansprechen, deren Töne ferner dem Grundtone eines Klanges und seinen Obertönen entsprechen. Sie haben einen durchdringenden Klang und dienen hauptsächlich dazu den Gesang der Gemeinde zu begleiten.

Die Jagd-, Signal- und Dampfpfeifen sind kurze Lippenpfeifen. Auch die Flöten gehören zu diesen. Bei letztern kann die Länge der Luftsäule durch Schließen resp. Oeffnung verschiedener Löcher verändert werden.

Zungenpfeifen. — Wie der Ton bei dieser Art von Pfeifen entsteht lehrt die Mundharmonika. Die Zungen sind gewöhnlich dünne elastische Plättchen, deren eines Ende an der schmalen Seite eines rechteckigen Rahmens befestigt ist, und die letzteren bis auf einen möglichst schmalen Zwischenraum ausfüllen. Sie werden durch einen Luftstrom in Bewegung gesetzt und ähnlich wie bei der Sirene entsteht ein Klang, indem bei jeder Schwingung der Zunge ein Luftstoß hervortritt. Bei den gewöhnlichen Zungenpfeifen befindet sich die Zunge im Innern der Luftsäule, welche durch sie zum Tönen gebracht werden soll. Gewöhnlich ist mit derselben noch ein Schallbecher verbunden. Ein verschiebbarer Steg (die Krücke) dient zum Stimmen der Zunge. Oeffnet sich die Zunge nach dem Innern der Röhre, so nennt man sie nach Helmholtz einschlagend. Der Ton einer solchen Zunge ist tiefer als wenn sie frei schwingt. Die Zungen der Orgelpfeifen, Physharmonika und der Holzblase-Instrumente (Clarinette, Oboe, Fagott) gehören zu dieser Art.

---

* Es sei hier erwähnt, daß es den Physikern Toepler und Boltzmann durch ein äußerst sinnreiches Verfahren, welches auf einer Combination des Principes der stroboskopischen Scheiben mit dem der optischen Interferenz beruht, gelungen ist, die Bewegung der Luft in einer gedeckten Orgelpfeife direct zu beobachten. Das Verfahren ist in einer bereits oben citirten Abhandlung Poggendorf's Annalen, Band CXLI, pag. 321 bis 352 beschrieben.

Wenngleich die Bewegung angeblasener Zungen ganz regelmäßig pendelartig ist, wie Helmholtz durch directe Beobachtung ermittelt hat, so ist die durch sie hervorgerufene Luftbewegung doch eine sehr discontinuirliche und wird daher eine lange Reihe von Obertönen enthalten, wie durch die Erfahrung bestätigt wird. Namentlich freie Zungen haben deshalb einen scharfen schnarrenden Klang, in welchem man die Obertöne wohl bis zum 20. hinauf und noch weiter hören kann. Am reichsten an Obertönen und demnach am schärfsten ist der Klang der auf ihre Rahmen aufschlagenden Zungen. Ebenso ist es, wenn sie aus hartem, unnachgiebigem Material gefertigt sind, wie die Messing- und Stahlzungen.

Wesentlich modificirt wird der Klang der Zungen durch die meistens damit in Verbindung gebrachten Ansatzröhren, indem dann ähnlich wie bei den Lippenpfeifen die Eigentöne der eingeschlossenen Luftsäulen durch Resonanz verstärkt werden. Die Ansatzröhren sind nach Helmholtz dabei an der Stelle der Zunge als geschlossen zu betrachten. Bei den Holzblaseinstrumenten dient eine einzige Zunge zum Hervorbringen aller Töne der ganzen Notenreihe. Die Zungen sind hier nämlich aus sehr leichtem elastischen Holz gefertigt und *können daher die Schwingungen der Luft mitmachen*. Die Eigentöne der Zungen werden bei diesen Instrumenten gar nicht gebraucht weil sie zu hoch und kreischend sind, vielmehr nur die Eigentöne des Rohres.

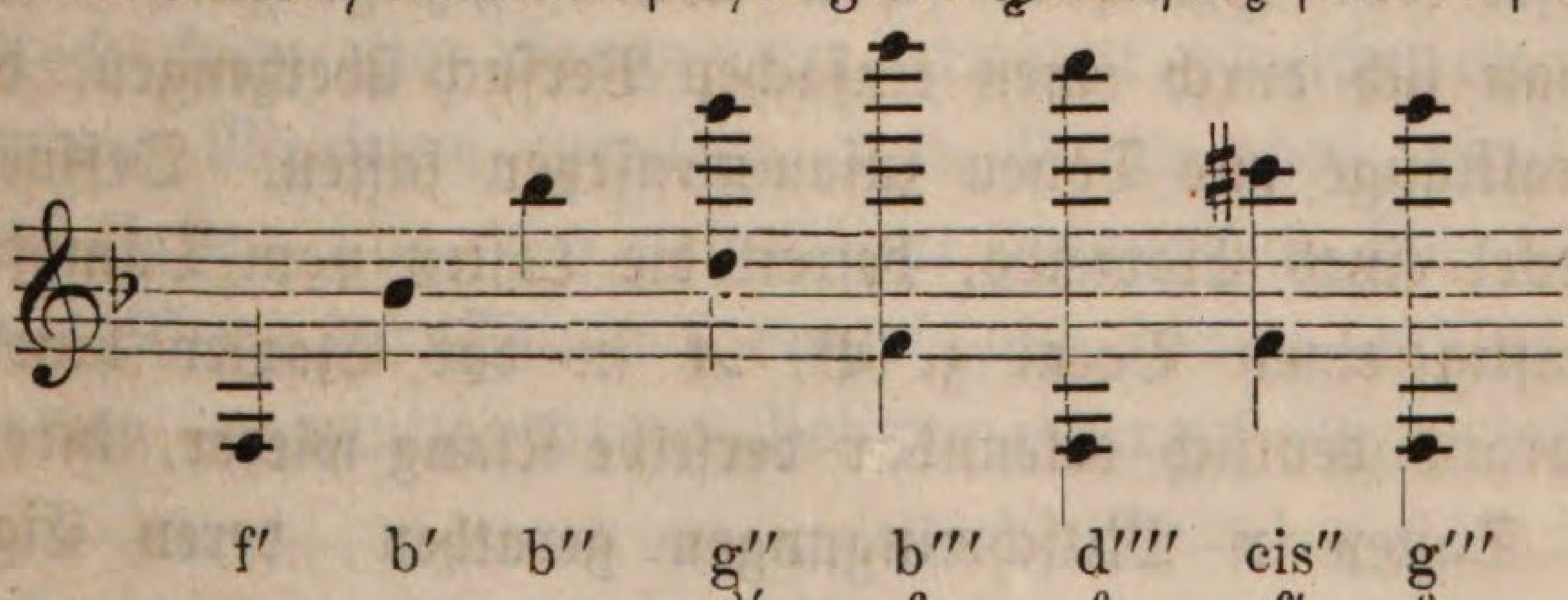
Bei den Blechinstrumenten bilden die menschlichen Lippen selbst die Zungen, welche, da sie sehr schwach elastisch sind, für sich sehr langsam schwingen würden. Durch ihre Schwingungen werden daher ebenfalls nur die Eigentöne des Rohres erregt und ihre Spannung und Form kommt daher nur insofern in Betracht, als dadurch die Höhe des erregten Eigentones bestimmt wird.

Menschliche Stimme. — Als wichtigstes Beispiel für die Zungenpfeifen haben wir die menschlichen Sprachwerkzeuge zu betrachten. Der Hauptheil derselben: der Kehlkopf mit den Stimmbändern befindet sich am oberen Ende der Luftröhre. Die Stimmbänder sind membranöse Zungen, welche über bewegliche Knorpel

ausgespannt sind und zwischen sich eine Spalte, *die Stimmritze*, lassen. Die verschiedene Höhe der Töne beim Gesange wird dadurch hervorbracht, daß die Spannung der Stimmbänder und die Weite der Stimmritze verändert werden. Geübte Sänger besitzen eine erstaunliche Fertigkeit in der richtigen Einstellung der Stimmbänder, auf welcher das sog. Treffen der Töne beruht. Künstlich kann man die Einrichtung des Kehlkopfes mit den Stimmbändern nachahmen, wenn man über die Mündung einer Röhre, welche von beiden Seiten her schräg zugeschnitten ist, zwei Membranen von dünnem Kautschuckblatt spannt, so daß sie zwischen sich eine Spalte lassen.

Die Zahl der Obertöne ist in der menschlichen Stimme namentlich beim Fortegesange sehr groß.

Vocalklänge. — Die *Vocale* werden durch verschiedene Stellungen der Mundhöhle hervorgebracht, welche hier die Stelle des Ansatzrohres vertritt. Sie sind nur als Verschiedenheiten der Klangfarbe des von den Stimmbändern hervorgebrachten Klanges zu betrachten. Daß in der That der Klang der Vocale wesentlich von der Stellung der Mundhöhle und der dadurch bedingten Resonanz abhängt, davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man einen Vocal ausspricht und nun bei unveränderter Stellung des Mundes durch Klopfen an den Backen die innere Luftmasse erschüttert. Man hört dann deutlich einen Klang welcher dem des vorhin ausgesprochenen Vocales ähnlich ist. Damit hängt auch das Flüstern zusammen. Durch eine Reihe von Stimmgabeln welche man dem Munde nähert, kann man genau die Eigentöne der Mundhöhle ermitteln für welche dieselben bei den verschiedenen Vocalen abgestimmt ist, die also durch Resonanz verstärkt werden. Nach der Untersuchung von Helmholtz sind es folgende:



f′	b′	b″	g″	b‴	d⁗	cis″	g‴
			d′	f	f	f′	f
U	O	A	Ä	E	J	Ö	Ü

Die übrigen Töne der Stimme werden gedämpft, und zwar um so stärker, je mehr die Mundhöhle geschlossen ist, also namentlich bei *U*, *J*, *Ü*. Am deutlichsten kann man die Resonanz der Mundhöhle für die obigen Noten bei den verschiedenen Vocalen mit Hülfe passend abgestimmter Resonatoren heraushören. Läßt man z. B. von jemanden den Vocal *O* auf irgend einen der harmonischen Untertöne von *b'* (*b*, *es*, *B*, *Ges*, *Es*) singen, so hört man stets dasselbe (*b'*) verstärkt. Es folgt hieraus, verdient aber hervorgehoben zu werden, daß es je nach der Höhe des von der Stimme hervorgebrachten Grundtones immer andere Obertöne sind, welche den Vocalklang hervorrufen, indem die Eigentöne der Mundhöhle fest und bestimmt sind, während die Höhe der Stimme wechselt. Aehnlich werden auch bei Streichinstrumenten die Eigentöne des in dem Resonanzkasten eingeschlossenen Luftkörpers verstärkt. Auch mag bei dieser Gelegenheit bemerkt werden, daß auch das Ohr selbst einen hohen Eigenton besitzt, der zwischen c^{IV} und g^{IV} liegt und den man besonders hell hört, wenn man z. B. den betreffenden Theil der Vocale auf dem Clavier angibt. Diese Töne machen sich, wenn man sich einmal gewöhnt hat, sie herauszuhören, namentlich beim Forte der menschlichen Stimme oder bei Chorgesängen oft sehr bemerklich, indem sie fast wie Schellengerassel klingen. Bei Orchestermusik treten sie weniger hervor.

Helmholtz hat mit Erfolg versucht, durch seine mit Resonatoren versehenen Stimmgabeln (vergl. §. 15) die Vocalklänge aus den für jeden ermittelten Einzelntönen zusammenzusetzen. Auch durch Zungenwerke, welche mit passend gestimmten Ansatzröhren versehen werden, lassen sich die Vocallaute nachahmen, wie dieses vor Helmholtz schon Willis gezeigt hat. Uebrigens kann man sich durch einen einfachen Versuch überzeugen, daß sich die Vocalklänge aus Tönen zusammensetzen lassen. Oeffnet man den Deckel eines Claviers, befreit die Tasten vom Dämpfer und ruft kräftig einen Vocal z. B. *A* in das Clavier hinein, so hallt daraus deutlich erkennbar derselbe Klang wieder, indem diejenigen Saiten in Mitschwingungen gerathen, deren Eigentöne den Theiltönen des Klanges entsprechen.

In sehr überraschender Weise läßt sich die Verschiedenheit der Vocalklänge durch den König'schen Flammenresonator (vergl. §. 10) selbst dem Auge zeigen. Singt man in das dazugehörige Mundstück dieselbe Note für verschiedene Vocale, während man den Spiegel langsam dreht, so zeigt sich bei jedem neuen Vocale sofort eine auffallende Veränderung der Flammenbilder, indem neue Zacken auftreten, andere verschwinden, und diese verschiedenen Formen sind so charakteristisch, daß man aus ihnen schon die Zahl und Stärke der Obertöne einigermaßen beurtheilen kann. Sehr übersichtlich wird die Erscheinung wenn man *O* auf den Ton *b* singt, wobei der Ton der Stimmbänder die tiefere Octave vom Eigentone der Mundhöhle ist, wenn dieselbe für den Vocal *O* gestellt ist. Man erkennt dann deutlich die Zusammensetzung des Flammenbildes aus den beiden einzelnen Bildern, welche die Töne *b* und *b'* einzeln hervorbringen.*)

Consonanten. — Die Verschiedenheit der Consonanten beruht theils auf der Art des Ansprechens (bei *b, p, d, t, g, k*) und der Intermittenz des Klanges (bei *r*), theils auf Nebengeräuschen (*f, w, l, s, z, sch*). Nicht ohne Erfolg hat man versucht die verschiedenen Sprachlaute, die man als eine Combination der Consonaten und Vocale betrachten darf, künstlich nachzuahmen. Noch vor wenigen Jahren wurde in größeren Städten Deutschlands (u. A. in Danzig) eine Sprechmaschine, die Faber'sche, gezeigt, welche die verschiedensten Worte verständlich artikulirte. Eine weniger vollkommene Sprechmaschine wurde schon im Jahre 1791 von Kempelen hergestellt. Als sehr rudimentäre Apparate dieser Art lassen sich auch die Kinderpuppen betrachten, mit welchen man ein deutliches „Mama" hervorbringen kann.

Noch seien die Bauchredner erwähnt, welche im übrigen wie andere Menschen sprechen, den Mund aber möglichst geschlossen halten und die Lippen nur unmerklich bewegen. So wird der Klang der Stimme dumpf und scheint aus der Ferne zu kommen, namentlich da die Betonung darauf eingerichtet wird.

---

* Vergl. Weinhold's Experimentalphysik, pag. 254.

Klänge mit unharmonischen Obertönen. — Die Klänge mit unharmonischen Obertönen betrachten wir nur kurz, da dieselben keinen musikalischen Charakter haben und deshalb in der künstlerischen Musik nur ausnahmsweise gebraucht werden.

Zunächst sind die unharmonischen Obertöne der Stimmgabeln zu erwähnen, welche beim heftigen Anschlagen derselben hervortreten. Sie machen nach Helmholtz 5,8 bis 6,6 mal so viele Schwingungen als der Grundton, sind mit ihm also nicht verschmolzen. Zuweilen werden einzelne derselben durch Zufall zum Grundtone harmonisch.

Aehnlich der Stimmgabel geben auch gerade elastische Stäbe beim Anschlagen hohe Obertöne. Dieses läßt sich schon deswegen erwarten, weil man eine Stimmgabel als zusammengesetzt aus zwei solchen Stäben betrachten kann, deren Enden befestigt sind, so daß der Stiel der Gabel den gemeinschaftlichen Befestigungspunkt bildet. Da die unharmonischen Obertöne schnell verklingen, so hat man abgestimmte Reihen von Stäben ihres durchdringenden hellen Tones wegen namentlich in der Militär- und Tanzmusik verwendet; so bei der Glas- und Stahlharmonika und bei der Strohfidel. Bei letzterer liegen Holzstäbe einfach auf Strohcylindern. Die Glas- und Stahlstäbe befestigt man, indem man sie zwischen zusammengedrehte Schnüre steckt, in den zwei Knotenlinien, welche vorhanden sind, wenn der in Transversalschwingungen versetzte Stab seinen Grundton angibt. Diese liegen um 0,2242 der ganzen Länge von den Enden, also 0,5516 der ganzen Stablänge von einander entfernt. Die Stäbe werden bei den genannten Instrumenten mit Hämmern aus Holz oder Kork geschlagen.

Auch die Obertöne elastischer Scheiben sind sowohl zum Grundtone als unter einander unharmonisch. Dasselbe gilt für die Klänge der Glocken, wenn ihre Wandstärke nahezu gleichmäßig ist, doch liegen bei diesen die unharmonischen Obertöne weiter von einander entfernt als bei den ebenen Scheiben. Gewöhnlich theilen sie sich durch Knotenlinien welche vom Scheitelpunkte nach dem Rande herablaufen in 4, 6, 8, 10 ꝛc. gleiche Abtheilungen, die man z. B. bei Gläsern leicht sichtbar machen

kann, wenn man ihre Höhlung zum Theil mit Wasser ausfüllt und den Rand in radialer Richtung mit dem Violinbogen streicht. Es bildet sich dann auf der Oberfläche des Wassers ein sehr zierliches Wellensystem, in welchem sich deutlich die einzelnen Abtheilungen zwischen den Knotenlinien erkennen lassen.

Wenn die Wandung der Glocken nach dem Rande zu dünner oder dicker wird, so ändert sich die Tonlage der Obertöne. Die Kunst des Glockengießers scheint hauptsächlich darin zu bestehen, eine Form der Glocke herzustellen, bei welcher die tieferen Töne zu einander harmonisch sind.

Allgemeine Sätze über Klangfarben. — Durch Untersuchung der verschiedenen Klänge hat Helmholtz einige allgemeine Gesetze über die Abhängigkeit der Klangfarbe von der Zusammensetzung des Klanges abgeleitet, welche theilweise im Vorhergehenden ihre Begründung gefunden haben. Es sind folgende:

1. Einfache Klänge klingen sehr weich und angenehm, aber unkräftig und in der Tiefe dumpf.

2. Klänge, welche von einer Reihe von Obertönen, etwa bis zum 6. inclusive begleitet sind, sind klangvoller, musikalischer, dabei vollkommen wohllautend und weich, so lange die höheren Obertöne fehlen. Hierzu gehören die Klänge des Fortepiano, die offenen Orgelpfeifen, die weicheren Pianotöne der menschlichen Stimme und des Hornes. Letztere machen den Uebergang zu den Klängen mit hohen Obertönen, während die Flötenpfeifen der Orgel sich den einfachen Tönen nähern.

3. Wenn die ungeradzahligen Obertöne da sind, wie bei den engen gedeckten Orgelpfeifen, den in der Mitte gezupften Saiten und der Clarinette, so bekommt der Klang einen hohlen, oder bei einer größeren Anzahl von Obertönen einen näselnden Ohreston. Der Klang ist dabei voll, wenn der Grundton an Stärke überwiegt, leer dagegen wenn dieses nicht der Fall ist. Deshalb ist der Klang weiter offener Orgelpfeifen voller, als der enger, der Ton von Zungenpfeifen mit passendem Ansatzrohr voller als der ohne ein solches, der Klang der Saiten, welche durch Pianoforte-Hämmer geschlagen werden voller als wenn

dieses mit einem Stöckchen geschieht, oder wenn sie mit den Fingern gerissen werden.

4. Der Klang wird scharf und rauh, wenn die Obertöne jenseits des 6. und 7. sehr deutlich sind. Der Grund hiervon liegt in den Dissonanzen, welche die höheren Obertöne mit einander bilden (vergleiche weiter unten §. 20). Bei geringerer Stärke beinträchtigen die hohen Obertöne die musikalische Brauchbarkeit nicht wesentlich, sind im Gegentheil günstig für die musikalische Charakteristik und Ausdrucksfähigkeit der Musik. Von dieser Art sind besonders wichtig die Klänge der Streichinstrumente, ferner die meisten Zungenpfeifen, wie Oboe und Fagott, Physharmonika und die menschliche Stimme. Der Grund weshalb die hohen dissonirenden Obertöne den Klang durchdringender machen, liegt in den Schwebungen welche sie mit einander geben. Das Nähere darüber findet sich in den folgenden Paragraphen.

18. Interferenz, Schwebungen, Combinationstöne. — Wenn Töne sehr verschiedener Höhe zu unserem Ohre gelangen, so werden wahrscheinlich auch sehr verschiedene Nervenfasern afficirt (vergl. §. 16), und deshalb wohl können sie in der Empfindung neben einander bestehen, ohne sich gegenseitig zu stören. Anders verhält es sich bei Tönen von gleicher oder nahezu gleicher Tonhöhe. Durch die ersteren werden die eigentlichen Interferenzerscheinungen, durch die zweiten die sogenannten Schwebungen hervorgerufen.

Ein auffallendes Beispiel der Interferenz ist folgendes: Stellt man zwei gleiche gedeckte Orgelpfeifen neben einander auf dieselbe Windlade und bläst sie zugleich an, so stellt sich bald ein solcher Bewegungszustand der Luft her, daß dieselbe abwechselnd in die eine und die andere Pfeife eintritt. Deshalb heben sich die von beiden ausgehenden Impulse im Ohre auf und man hört nur ein Sausen, während jede der beiden Pfeifen kräftig tönt, wie man an der Bewegung einer Flaumfeder erkennen kann, welche man vor die Mundöffnungen der Pfeifen hält.

Auch die Stimmgabel zeigt Interferenzerscheinungen. Da die Zinken derselben sich stets in entgegengesetzten Richtungen be-

wegen, so heben sich die an ihnen hervorgebrachten Luftwellen in gewissen Richtungen auf, wie man hört, wenn man eine angeschlagene Stimmgabel in die Nähe des Ohres bringt und um ihren Stiel langsam herumdreht.

Schwebungen treten hervor, wenn zwei nahezu gleiche Töne neben einander erklingen. Man nimmt sie z. B. beim Stimmen eines Claviers wahr, wenn zwei zu derselben Taste gehörige Saiten angeschlagen werden, welche nicht genau dieselbe Tonhöhe haben. Es zeigt sich dann ein rhythmisch wiederkehrender Wechsel der Tonstärke, und zwar folgen die einzelnen Anschwellungen des Tones um so langsamer, je mehr sich die Töne der vollen Consonanz nähern. Sind die Schwebungen langsam, so machen sie keinen unangenehmen, unter Umständen (z. B. bei den Orgeln) sogar einen feierlichen Eindruck. Am unerträglichsten sind sie, wenn ihre Zahl in der mittleren Tonlage etwa 33 in der Secunde beträgt. Sehr schnelle Schwebungen, etwa über 120 in der Secunde werden nicht mehr deutlich vom Ohre unterschieden.

Die Schwebungen entstehen indem die Luftwellen der beiden Töne sich zu gewissen Zeiten verstärken, zu anderen schwächen. Man übersieht den ganzen Vorgang sofort, wenn man sich die Schwingungscurven der beiden Töne vorstellt oder aufzeichnet. Macht z. B. der eine Ton in derselben Zeit 11 Schwingungen in welcher der zweite deren 10 ausführt und nimmt man an, daß die beiden Curven in derselben Punkten beginnen, so wird der Endpunkt der 11. Welle der ersten Curve mit dem Endpunkte der 10. Welle der zweiten zusammenfallen und beide Curven werden von da ab wieder denselben Verlauf zeigen wie vom Nullpunkte der Zeit. Es werden also beide sich nach derselben Seite krümmen, wenn dieses am Anfange der Fall war, während dann in der Mitte einer solchen Periode von 10 resp. 11 Schwingungen die Berge der ersten Curve den Thälern der zweiten gegenüber liegen. Es bleiben nämlich die Berge der ersten Curve hinter denen der zweiten mehr und mehr zurück, ähnlich wie die Theilstriche des Nonius hinter denen des Limbus. Demnach werden nach je 10 Schwingungen des ersten Tones die Maxima

der Tonstärke eintreten, während in der Mitte zwischen zwei solchen „Schlägen" die Minima liegen, welche man „Pausen" nennt. Nur bei gleich starken einfachen Tönen findet in den Pausen ein vollständiges Schweigen statt. Bei den zusammengesetzten Klängen treten während den Pausen des Grundtones die Obertöne hervor und der Ton springt dann z. B. leicht in die Octave über. Außerdem können auch die Obertöne unter sich Schwebungen geben.

Die Anzahl der Schwebungen pro Secunde ist stets gleich der Differenz der Schwingungszahlen beider Töne. Macht z. B. ein Ton 220 Schwingungen in der Secunde, der andere 200, so beträgt die Zahl der Schwebungen 20. Dieselben folgen in Zwischenzeiten von je $\frac{1}{20}$ Secunde, weil in dieser Zeit der eine Ton 11 der zweite 10 Schwingungen macht. Man kann die Schwebungen auf verschiedene Art sichtbar machen, z. B. indem man die beiden schwebenden Töne auf die Membrane eines Phonautographen wirken läßt. Die entstandene Curve gibt durch die verschiedene Breite der Elongationen denselben Eindruck für das Auge wieder, welchen die Töne im Ohre hervorrufen.

Combinationstöne. — Es frägt sich nun, was aus den Schwebungen wird, wenn dieselben (bei allmäliger Vergrößerung des Intervalles der schwebenden Töne) schneller und schneller werden. Nach der älteren, von Thomas Young aufgestellten Theorie, welche man auch in vielen Lehrbüchern wiedergegeben findet, vereinigen sie sich zur Empfindung eines Tones und bilden so die Ursache der sogenannten „Combinationstöne". Es sind dieses Töne, welche man zuweilen beim Zusammenklange zweier anderer neben diesen hört, und deren Schwingungszahlen ebenfalls wie die der Stöße gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden primären Töne sind. (Stehen die letzteren z. B. um das Intervall einer Quinte von einander ab, so daß man ihre Schwingungszahlen durch 3 m und 2 m bezeichnen kann, so hat der entstehende Combinationston die Schwingungszahl m, bildet also die untere Octave des tieferen primären Tones.) Die Stöße machen indessen einen ganz anderen Ein-

druck auf das Ohr als die Combinationstöne. Wegen der durch die Pausen hervorgerufenen Intermittenz des Schalles, welche bewirkt, daß die Gehörnerven zwischen je zwei Stößen etwas Ruhe haben und daher wieder für den folgenden Reiz empfindlich werden, ist die durch starke und mäßig schnelle Schwebungen hervorgerufene Empfindung eine so unangenehme, ja quälende, welche sich etwa mit derjenigen vergleichen läßt, welche ein flackerndes Licht im Auge oder ein Kratzen auf der Haut hervorruft. Aus demselben Grunde ist uns auch das knarrende Geräusch einer Säge oder Schnarre so unangenehm. Kennt man den Eindruck der Stöße einmal, so kann man sie auch dann noch unterscheiden, wenn ihre Zahl viel größer geworden ist, als die Schwingungszahl der tieferen wahrnehmbaren Töne.

Helmholtz gelang es durch allmälige Beschleunigung der Schwebungen bis 120 in der Secunde noch wahrnehmen zu können. Außerdem hat derselbe durch theoretische Untersuchungen nachgewiesen, daß das Auftreten der Combinationstöne eine Folge zu großer Elongationen der Luftschwingungen ist, wenn nämlich die beschleunigende Kraft, durch welche die Schwingungen bewirkt werden, nicht mehr der ersten Potenz der Entfernung des Theilchens von der Gleichgewichtslage proportional gesetzt werden kann, sondern außerdem auch noch vom Quadrate derselben abhängt, (vergl. Wellenlehre §. 8) die Theilchen also nicht mehr einfache Sinusschwingungen machen. Helmholtz hat zugleich gezeigt, daß es noch eine andere, bis dahin nicht bekannte Art von Combinationstönen, die Summationstöne gibt, deren Schwingungszahl gleich der Summe der primären Töne ist, und dieselben ebenfalls durch das Experiment nachgewiesen.

19. Consonanz und Dissonanz. — Auf den Schwebungen beruht hauptsächlich die Rauhigkeit des Zusammenklanges zweier Töne, welche wir mit dem Namen Dissonanz bezeichnen. Der Grad der Rauhigkeit hängt indessen nicht allein von der Anzahl der Schwebungen, sondern auch von der Tonlage ab. In den tieferen Lagen sind sie weniger unangenehm, weil hier dieselbe Zahl von Schwebungen einem größeren Intervalle entspricht. So geben die Intervalle C — G und h' — c'' beide

je 33 Schwebungen. Der erste derselben ist aber eine Consonanz, der zweite eine der unangenehmsten Dissonanzen. Es hängt dieses wohl damit zusammen, daß der Ton *C* nicht mehr auf die für *G* abgestimmten Nervenfasern wirkt, während die beiden naheliegenden Töne *h'* *c''* auf eine größere Anzahl benachbarter Fasern zugleich wirken und in denselben Stöße erregen.

Bei sehr entfernten Tönen können noch die Schwebungen der Obertöne und der Combinationstöne eine Rolle spielen, ja es können sogar die Theiltöne eines Klanges, namentlich die oberen, welche wenig auseinander liegen, wenn sie hinreichend intensiv sind, mit einander Schwebungen geben.

Besonders wichtig für die Musikwissenschaft ist die Untersuchung der bei den consonanten Intervallen möglichen Schwebungen. Wir betrachten zunächst die beiden Intervalle, welche durch die einfachsten Schwingungsverhältnisse 2 : 1 und 3 : 1 characterisirt sind, nämlich die Octave und die Duodezime. Bezeichnet man den Grundton durch *C*, und fügt jedem Tone seine harmonischen Obertöne bei, so erhält man folgende Uebersicht:

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c		2		4		6		8		10
g			3			6			9	

Wie man sieht, fallen die Theiltöne sowohl der Octave (*c*) als auch der Duodezime (*g*) mit denen des Grundtones zusammen. Beide bilden daher mit dem letzteren vollkommene Consonanzen, d. h. wenn ihre Schwingungszahlen zu denen des Grundtones genau in den theoretisch geforderten Verhältnisse stehen. Findet die geringste Abweichung statt, so muß sich dieselbe sofort durch die heftigsten Schwebungen selbst der niederen Obertöne bei der Octave, der höheren bei der Duodezime bemerkbar machen. Je mehr Theiltöne zusammentreffen, desto reiner und schärfer begrenzt wird also das Intervall; am schärfsten begrenzt ist die Octave, darauf folgt die Duodezime.

Betrachten wir nun die Quinte in derselben Weise

	C	*G*	*c*	*g*	*c'*	*d'*	*e'*	*g'*
C	2		4	6	8		10	12
G		3		6		9		12

Hier fallen, wie man sieht, nur die Theiltöne 6 und 12 zusammen, dagegen geben die Theiltöne 8 und 9, nämlich *c'* und *d'* Schwebungen; die Quinte ist daher kein vollkommen consonantes Intervall.

Noch mehr dissonante Elemente enthalten die Quarten, Sexten, Terzen, und demnach können wir die Consonanzen mit Helmholtz folgendermaßen ordnen.

1. Vollkommene Consonanzen: Octave und Duodezime.
2. Nächstvollkommene Consonanzen: Quinte und Quarte.
3. Mittlere Consonanzen: Große Sexte und kleine Terz.
4. Unvollkommene Consonanzen: Kleine Sexte und kleine Terz.

Aus dem Vorstehenden folgt unmittelbar, daß der Grad der Consonanz auch wesentlich von der Zahl und Stärke der vorhandenen Obertöne, also von der Klangfarbe abhängt.

Die Wirkung der Combinationstöne ist derjenigen der Obertöne durchaus gleich; da sie gewöhnlich schwächer sind, haben sie weniger Bedeutung. Erst bei einfachen Tönen werden sie wichtig, da sie hier für die Theiltöne eintreten. Hat man z. B. *c'* und *c*, so ist ihr erster Differenzton nach dem Früheren *c*; dieser wird mit dem primären Tone schweben, wenn die Stimmung nicht genau war.

In ähnlicher Weise sind auch noch die Quinte und Quarte durch ihre Differenztöne begrenzt; bei den übrigen Intervallen (No. 3 und 4) tragen sie indessen nicht zur Begrenzung bei, wenn dieselben nicht etwa aus einfachen Tönen bestehen.

Nach dem Obigen wird es möglich sein für bestimmte Klangfarben, wenn man die Zahl und Stärke der Theiltöne zweier zugleich angegebenen Klänge kennt, den Grad der Rauhigkeit ihres Zusammenklanges theoretisch zu bestimmen, d. h. durch Zahlenverhältnisse auszudrücken. Helmholtz hat diese Rechnung für die Klangfarbe der Violine, welche er experimentell studirt hatte, durchgeführt und die Resultate derselben graphisch dargestellt. Dadurch tritt der Grad des Wohlklanges der einzelnen Intervalle, zugleich auch die Abhängigkeit derselben von der Höhe der Tonlage auch dem Auge deutlich erkennbar hervor.*)

---

* Vergl. Helmholtz, Lehre von den Tonempfindungen, pag. 292 (I. Auflage).

20. Verwandtschaft der Töne und Accorde. — Da die Consonanz, wie so eben erläutert ist, wesentlich auf dem Zusammenfallen der Obertöne beruht, so stehen solche Töne, bei denen dieses Zusammenfallen stattfindet, in naher harmonischer Beziehung, welche Helmholtz „Verwandtschaft" nennt. Töne sind im ersten Grade verwandt, wenn sie einen gemeinschaftlichen Theilton besitzen, im zweiten Grade, wenn sie beide mit einem dritten Tone im ersten Grade verwandt sind. Je stärker die übereinstimmenden Partialtöne im Verhältniß zu den übrigen Partialtönen sind, desto stärker ist die Verwandtschaft, desto leichter wird sie bemerkt. Da die Obertöne gewöhnlich um so schwächer sind, je höher ihre Ordnungszahl ist, so wird die Verwandtschaft um so schwächer, je höher die übereinstimmenden Obertöne liegen. Ebenso wird die Verwandtschaft der Accorde durch die Gleichheit eines der Töne bedingt aus denen sie zusammengesetzt sind. Ein Klang mit seinen Obertönen ist ja gewissermaßen selbst ein Accord.

Das Princip der harmonischen Verwandtschaft der Töne ist insofern sehr wichtig, als Helmholtz mit Erfolg versucht hat, aus demselben die allmälige Entwickelung der musikalischen Gesetze, wie sie in den Musikstücken der verschiedenen Zeiten und Völker verkörpert erscheinen, zu erklären. Er hat nämlich an der Hand der Geschichte der Musik nachgewiesen, daß die Verwandtschaften zuerst der einzelnen Klänge und später der Accorde nur allmählig durch den musikalischen Sinn aufgefunden wurden. Die Musik unterscheidet sich dadurch wesentlich von den anderen Künsten, daß sie das Material für ihre Schöpfungen (Töne der menschlichen Stimme und der Musikinstrumente) selbst auswählen konnte, während z. B. die Poesie dasselbe in den Worten des Sprachschatzes bereits fertig vorfand. Verfolgt man nun die Ausbildung des Tonmateriales, so zeigt sich zunächst, daß die älteste Musik aller Völker homophon war, d. h. nur einstimmige Melodieen enthielt. Die Melodie läßt sich erklären als Veränderung der Tonhöhe in der Zeit nach fest bestimmten Stufen, denen eine regelmäßige Theilung sowohl der Zeit als auch der Tonhöhe nach zu Grunde liegt. Die Grundlage der Zeitmessung ist der Rhythmus. Aber auch die Tonhöhe bedarf, wenn sie

anschaulich gegliedert erscheinen soll, der stufenweisen Abtheilung. Sonst würde nur ein wirrer Eindruck wie etwa das Heulen der Kinder, hervorgebracht werden können. Die Tonleiter bildet nur den Maßstab, nach welchem die Höhe gemessen wird. Die Tonleiter und der Rhythmus sind also analoge Begriffe, wie dieses auch von den musikalischen Theoretikern alter und neuer Zeit bemerkt ist.

Bei der Auswahl der Tonstufen in den Leitern zeigen sich nun allerdings Verschiedenheiten des nationalen Geschmackes, doch finden sich einige der consonanten Intervalle, die Octave, Quinte, Quarte in allen Tonleitern. Sucht man nun nach dem Grunde, aus welchem diesen der Vorzug eingeräumt wurde, so bietet sich als der natürlichste die Verwandtschaft der zu ihnen gehörigen Töne dar. Aus der Harmonie können sie nämlich nicht abgeleitet werden, da die Tonleitern lange vor Erfindung der harmonischen Musik vorhanden waren. In der That kann man aber die bekannten Tonleitern sämmtlich aus dem Principe der Verwandtschaft ableiten, wie wir nach Helmholtz zeigen wollen. Stellen wir zunächst die Töne nebst ihren Obertönen zusammen, welche mit dem willkürlich gewählten Grundtone *C* im ersten Grade verwandt sind.

	C	*c*	*g*	*c'*	*e'*	*g'*	*h'*	*c''*	*d''*	*e''*	
C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Grdton.
c	—	2	—	4	—	6	—	8	—	10	Octave.
g	—	—	3	—	—	6	—	—	9	—	Duodez.
G	— $(\frac{3}{2})$	—	3	— $(\frac{9}{2})$	—	6	— $(\frac{15}{2})$	—	9	— $(\frac{21}{2})$	Quinte.
A	— $(\frac{5}{3})$	—	— $(\frac{10}{3})$	—	5	— $(\frac{20}{3})$	—	— $(\frac{25}{3})$	—	10	gr. Sext.
F	— $(\frac{4}{3})$	— $(\frac{8}{3})$	—	4	— $(\frac{16}{3})$	— $(\frac{20}{3})$	—	8	— $(\frac{28}{3})$	—	Quarte.
E	— $(\frac{5}{4})$	— $(\frac{5}{2})$	— $(\frac{15}{4})$	—	5	— $(\frac{25}{4})$	— $(\frac{30}{4})$	— $(\frac{35}{4})$	—	10	gr. Terz.
Es	— $(\frac{6}{5})$	— $(\frac{12}{5})$	— $(\frac{18}{5})$	— $(\frac{24}{5})$	—	6	— $(\frac{36}{5})$	— $(\frac{42}{5})$	— $(\frac{48}{5})$	—	kl. Terz.
As	— $(\frac{8}{5})$	— $(\frac{16}{5})$	—	— $(\frac{24}{5})$	—	— $(\frac{32}{5})$	—	8	— $(\frac{48}{5})$	—	kl. Sext.

Vergleicht man die Anzahl und Ordnung der zusammenfallenden Obertöne, so erkennt man aus der vorstehenden Tabelle sofort die Stärke der Verwandtschaft der einzelnen in ihr enthaltenen Töne zum Grundton oder der Tonica. Die Octave geht mit ihren Obertönen ganz in der Tonica auf; dasselbe gilt von der Duodezime, wenngleich bei dieser die Verwandtschaft erst

beim Oberton 3 beginnt. Die Quinte zeigt schon Abweichungen ($\frac{3}{2}$, $\frac{15}{2}$), die sich bei den folgenden Intervallen mehr und mehr steigern, so daß die kleine Terz, bei welcher die Uebereinstimmung erst in den Tönen 6 und 7 eintritt, nur noch als sehr schwach verwandt mit der Tonica anzusehen ist. Noch mehr gilt dieses von der kleinen Sexte (8 : 5), die kaum mehr zu den verwandten Tönen gezählt werden kann, da der 8. Oberton, durch welchen die Verwandtschaft vermittelt wird, selten heraus zu hören ist.

Beschränken wir uns auf das Intervall einer Octave, so können wir die mit der Tonica im ersten Grade verwandten Töne nach der Stärke ihrer Verwandtschaft in folgende Reihe ordnen:

1. in der aufsteigenden Octave

c	*c′*	*g*	*f*	*a*	*e*	*es*
1 : 1	1 : 2	2 : 3	3 : 4	3 : 5	4 : 5	5 : 6

2. in der absteigenden Octave

c	*C*	*F*	*G*	*Es*	*As*	*A*
1 : 1	2 : 1	3 : 2	4 : 3	5 : 3	5 : 4	6 : 5

Wollte man die Reihe noch weiter fortsetzen, so käme man auf zu enge Intervalle, welche sich nicht mehr mit Leichtigkeit unterscheiden lassen. Wie weit man darin gehen dürfe, hängt natürlich von der Feinheit des Ohres ab. Historisch sei in dieser Beziehung bemerkt, daß bei den Chinesen und Gälen ursprünglich ganze Tonstufen die kleinsten Intervalle waren, während die Griechen noch halbe, die Asiaten sogar noch drittel und viertel Töne unterscheiden. Hält man den halben Ton (16 : 15) als Grenze fest, so darf man nicht *Es* — *E* und *As* — *A* in dieselbe Leiter bringen.

Ordnet man die obigen im ersten Grade verwandten Töne nach ihrer Höhe, so erhält man

1. aufsteigend: *c* — — *e* — *f* — *g* — *a* — — *c′*

   Intervalle: $\frac{5}{4}$ $\frac{16}{15}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{6}{5}$

2. absteigend: *c* — — *As* — *G* — *F* — *Es* — — *C*

   Intervalle: $\frac{5}{4}$ $\frac{16}{15}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{6}{5}$

Die am Anfange und Ende der so erhaltenen Leitern noch übrig bleibenden größeren Lücken lassen sich nur durch Verwandte zweiten Grades ausfüllen. Diese werden am nächsten vermittelt durch die **absteigenden** Verwandten von *c'*, welche nach der obigen Reihe sind, wenn man sie sogleich nach der Höhe ordnet:

c — — *es* — *f* — *g* — *as* — *c'*

dieses sind aber die Töne der aufsteigenden **Molltonleiter**, welche sich bekanntlich von der Durtonleiter hauptsächlich durch Substituirung der **kleinen Terz** (*c* — *es*) statt der großen (*c* — *e*) unterscheidet. Auf *c'* bezogen erscheint hier *es* als große Sexte, doch ist es mit *c* ebenfalls, wenngleich schwächer (nämlich durch den Oberton (*b*) verwandt. Die noch schwächere Verwandtschaft *c* — *as* ist, wie schon oben erwähnt, schwerlich zu bemerken. Man wird daher in der aufsteigenden Tonleiter eher *e* in *es* als *a* in *as* verwandeln können. Demnach erhält man die folgenden drei aufsteigenden Leitern

c — *e* — *f* — *g* — *a* — *c'*
c — *es* — *f* — *g* — *a* — *c'*
c — *es* — *f* — *g* — *as* — *c'*

Der Unterschied der dritten Tonleiter, welche das als nur im zweiten Grade mit der Tonica verwandt zu betrachtende *as* enthält, ist zwar nur gering, doch liegt er wahrscheinlich der bekannten Umbildung der aufsteigenden Molltonleiter zu Grunde.

Ergänzen wir nun noch in ähnlicher Weise die obige von *c* abwärts gehende Reihe (2) durch die aufsteigenden Verwandten von *C*, so erhalten wir, wenn wir sie ebenfalls nach der Tonhöhe ordnen

c — *A* — *G* — *F* — — *E* — *C*

das Intervall *c* — *A* (6 : 5) enthält noch eine schwache Verwandtschaft ersten Grades, *c* — *E* aber nur eine zweiten Grades. Mithin erhalten wir folgende drei absteigende Leitern:

C — — *As* — *G* — *F* — *Es* — *C*
c — *A* — *G* — *F* — *Es* — *C*
C — *A* — *G* — *F* — *E* — — *C*

Bisher haben wir nur die durch die Octave der Tonica vermittelten Verwandtschaften betrachtet. Vergleichen wir nun noch

die Verwandten der Quinte *g* mit denen vom *c*. Es sind aufsteigend

c verwandt: *c* — — *e* — *f* — *g* — *a* — — *c'*

g verwandt: *c* — *d* — *es* — — *g* — — *h* — *c'*

Durch Verbindung dieser Töne erhält man

1. die aufsteigende Durtonleiter oder das lydische Geschlecht der Griechen

c — *d* — *e* — *f* — *g* — *a* — *h* — *c'*

2. die aufsteigende Molltonleiter

c — *d* — *es* — *f* — *g* — *a* — *h* — *c'*

Absteigend erhält man

c verwandt: *c* — — *As* — *G* — *F* — *Es* — *C*

g verwandt: *c* — *B* — — *G* — — *Es* — *D* — *C*

und daraus durch Combination

3. die absteigende Molltonleiter oder das aeolische Geschlecht der Griechen

c — *B* — *As* — *G* — *F* — *Es* — *D* — *C*

4. die phrygische Tonleiter

c — *B* — *A* — *G* — *F* — *Es* — *D* — *C*

Durch Berücksichtigung der Verwandten der Unterquinte *F* lassen sich noch die anderen in der alten Musik vorkommenden Tongeschlechter erklären.*) Doch gehen wir darauf nicht ein, da es uns nur darauf ankam, die Methode der Ableitung aus dem Principe der Verwandtschaft zu verdeutlichen und namentlich auch zu zeigen, wie sich der sonst wohl schwer zu erklärende Unterschied zwischen der aufsteigenden und absteigenden Molltonleiter danach fast von selbst ergibt.

Accorde. — Accorde sind Zusammenklänge von mehr als zwei Einzelklängen. Consonante Accorde dürfen nur consonante Intervalle enthalten; denn wenn nur zwei ihrer Einzelklänge Schwebungen geben, so ist der Wohlklang gestört.

Um consonirende dreistimmige Accorde zu finden, darf man nur zum Grundtone *c* zwei consonirende Intervalle zusetzen,

---

* Vergl. Helmholtz. a. a. O. p. 424—425.

welche selbst consonirend sind. Beschränkt man sich dabei auf kleinere Intervalle als eine Octave, so erhält man aus allen möglichen Zusammenstellungen folgende consonanten dreistimmigen Accorde:

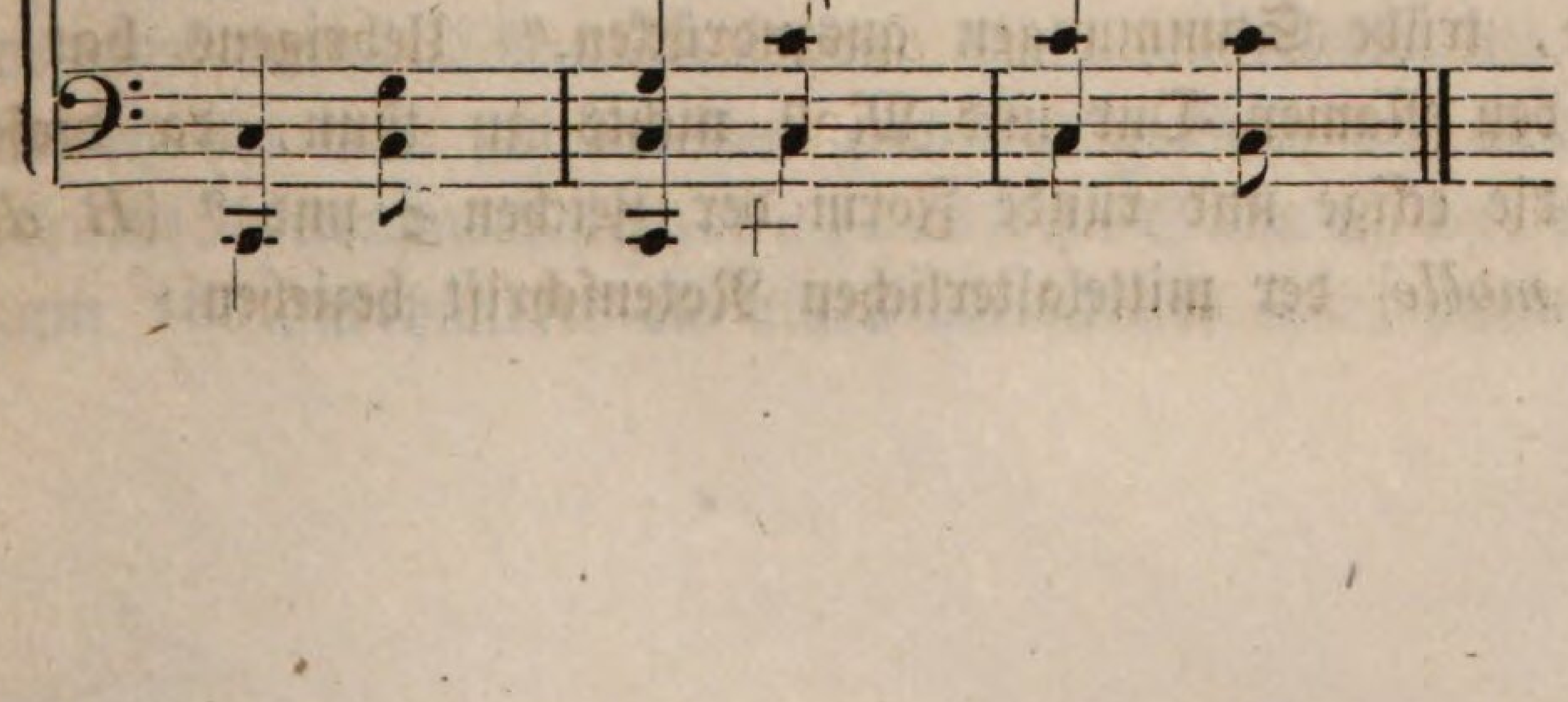
1) *C E G*	2) *C Es G*
3) *C F A*	4) *C F As*
5) *C Es As*	6) *C E A*

(1) ist der Durdreiklang, (2) der Molldreiklang, (3) und (4) sind die Quartsextenaccorde, (5) und (6) die Sextenaccorde. Behält man dieselben Intervalle bei, verändert aber die Baßnoten der vier letzten Accorde, so kann man die consonanten Accorde auch zu folgendem Tableau zusammenstellen:

C E G	*C Es G*
E G C	*Es G C*
G C E	*G C Es.*

Der Wohlklang der einzelnen Accorde hängt zunächst von dem Grade der Consonanz der einzelnen Intervalle ab. Die Stufenfolge ist in dieser Beziehung nach dem Früheren (vergl. die Tabelle pag. 273): Quinte, Quarte, große Sexte, große Terz, kleine Terz, (kleine Sexte). Außerdem spielen aber die Combinationstöne hierbei noch eine Rolle, da sie ebenfalls Schwebungen hervorbringen können, auch wo die Intervalle an sich keine bedingen würden. Bezeichnet man in Notenschrift die primären Töne durch halbe Noten, ihre Combinationstöne durch Viertelnoten, die Combinationstöne der primären Töne und ersten Obertöne mit Achteln und Sechzehnteln, so erhält man folgende Uebersicht:

1) Durdreiklänge mit den Combinationstönen



2) Molldreiklänge:



Die Pausenstriche deuten an, daß der betreffende Ton eigentlich etwas tiefer ist. Die mit Sechzehnteln bezeichneten Combinationstöne sind selbst auf der Physharmonika nicht mehr hörbar, obgleich dieselbe aus Zungenwerken besteht und diese recht scharfe Klangfarben enthält; sie können deshalb für gewöhnlich vernachlässigt werden. Bei den Durdreiklängen geben, wie man sieht, die Combinationstöne erster Ordnung und selbst die tieferen Combinationstöne zweiter Ordnung nur die Verdoppelungen der Töne des Accordes in den tieferen Octaven; die Combinationstöne höherer Ordnung aber sind äußerst schwach und stören daher nicht merklich.

Bei den Mollaccorden dagegen sind schon die Combinationstöne erster Ordnung störend, da sie außer der Harmonie liegen, wenngleich sie wegen ihres weiten Abstandes von den Grundtönen mit denselben keine Schwebungen hervorbringen. Beim Grundaccord und Sextenaccord setzen diese (mit Viertelnoten bezeichneten) Combinationstöne einen *As-Dur*-Dreiklang zusammen, während die Combinationstöne zweiter Ordnung Schwebungen hervorrufen. So kommt in die Mollaccorde etwas Fremdartiges hinein, wodurch der Wohlklang verschleiert und unklar erscheint, ohne daß der Hörer sich den Grund davon zu entziffern weiß, weil die schwächeren Combinationstöne von den stärkeren Tönen übertönt werden. „Daher sind die Mollaccorde so geeignet, unklare, trübe Stimmungen auszudrücken." Uebrigens hat dieses mit den Namen Dur und Moll nichts zu thun, da diese sich auf die eckige und runde Form der Zeichen ♮ und ♭ (*B durum* und *molle*) der mittelalterlichen Notenschrift beziehen.

Die Verwandtschaft der in einem consonanten Accorde enthaltenen Einzelklänge muß beim Zusammenklange viel deutlicher hervortreten als bei der melodischen Folge derselben. Denn erstlich beruht sie auf der unmittelbaren sinnlichen Empfindung gleichzeitig gehörter Klänge, während die melodische nur durch die Erinnerung an die vorausgegangenen gefunden werden konnte. Außerdem aber bilden die Schwebungen, welche nur bei dem Zusammenklange entstehen, ein scharf hervortretendes Merkmal der Consonanz resp. der Verwandtschaft. Deshalb konnte man auch seit der Erfindung der polyphonen (mehrstimmigen) Musik im Mittelalter sehr viel entlegenere Verwandtschaften benutzen. Da ferner mit der Zahl der zusammenklingenden Töne die Mannigfaltigkeit der Beziehungen zwischen ihnen wächst, und deshalb namentlich auch Modulationen in verschiedenen Tonarten schneller und leichter ausführbar wurden, so erklärt sich die so rasche und reiche Entwickelung der musikalischen Ausdrucksmittel in den letzten Jahrhunderten. Daß in der That bei der Bildung der Uebergänge das Gefühl für die Verwandtschaft der Klänge und Accorde die Musiker geleitet hat, wenngleich sie sich dessen nicht bewußt waren, erhellt daraus, daß Helmholtz das gesammte System von Regeln, welche die Lehre vom Generalbaß bilden, aus dem erwähnten Principe ableiten konnte.

Temperirte Stimmung. — Bei der Ausführung von Musikstücken muß man nicht nur über die Höhe der Tonica frei verfügen, sondern dieselbe, der vorkommenden Modulationen wegen, auch von Zeit zu Zeit verändern können. Dabei entsteht für den Gesang keine Schwierigkeit, wohl aber für die musikalischen Instrumente, namentlich für diejenigen, welche nur gewisse feste Tonstufen besitzen, wie z. B. die Harfe und das Clavier. So lange man indessen keine Uebergänge in entfernte Tonarten ausführte, konnte man sich mit der Erhöhung und Erniedrigung einzelner Tonstufen helfen. Seit der Entwickelung der neueren harmonischen Musik mit ihrem Reichthume an Modulationen hat man sich indessen genöthigt gesehen, die aus dem Alterthume überkommene phythagoräische Stimmung, welche bis zum 16. Jahrhundert die allein herrschende war, aufzugeben

und an ihre Stelle die noch jetzt allgemein herrschende **temperirte** zu setzen.

Die pythagoräische Stimmung basirte darauf, daß man von einem Grundtone *C* in **reinen Quinten** aufwärts ging. Dadurch erhält man, wenn man von der Höhe der Tonlage absieht, folgende Töne:

C G D A E H Fis Cis
Gis Dis Ais Eis His.

Geht man immer um zwei Quinten aufwärts und um eine Octave zurück, so ergibt sich das Intervall $\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{9}{8}$ oder eine große Secunde. So erhält man

C D E Fis Gis Ais His

$$1 \cdot \left(\frac{9}{8}\right) \left(\frac{9}{8}\right)^2 \left(\frac{9}{8}\right)^3 \left(\frac{9}{8}\right)^4 \left(\frac{9}{8}\right)^5 \left(\frac{9}{8}\right)^6$$

Geht man umgekehrt von *C* in Quinten abwärts, so erhält man die Reihe

C F B Es As Des Ges Ces
Fes Bb Eses Ases Deses

oder wenn man auch hier wiederum um zwei Quinten abwärts und um eine Octave aufwärts geht $\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3} \times 2 = \frac{8}{9}\right)$, so erhält man

C B As Ges Fes Eses Deses

$$1 \cdot \left(\frac{8}{9}\right) \left(\frac{8}{9}\right)^2 \left(\frac{8}{9}\right)^3 \left(\frac{8}{9}\right)^4 \left(\frac{8}{9}\right)^5 \left(\frac{8}{9}\right)^6.$$

Nun ist

$$\left(\frac{8}{9}\right)^6 = \frac{262144}{531441} = \frac{1}{2} \cdot \frac{524288}{531441}$$

oder abgekürzt,

$$\left(\frac{8}{9}\right)^6 = \frac{1}{2} \cdot \frac{73}{74}$$

$$\left(\frac{9}{8}\right)^6 = 2 \cdot \frac{74}{73}$$

His ist also um $\frac{73}{74}$ höher als die Octave von *C* und *Deses*

um $\frac{73}{74}$ tiefer als die untere Octave von *C*. Derselbe constante Unterschied findet sich, wenn man von *C* und *Deses* aus in reinen Quinten fortschreitet zwischen folgenden Tönen:

C	und	*Deses*	*Cis*	und	*Des*
G	„	*Ases*	*Gis*	„	*As*
D	„	*Eses*	*Dis*	„	*Es*
A	„	*Bb*	*Ais*	„	*B*
E	„	*Fes*	*Eis*	„	*F*
H	„	*Ces*	*His*	„	*C*.
Fis	„	*Ges*			

Die auf der linken Seite jeder Reihe stehenden Töne sind also alle um $\frac{74}{73}$ höher. Für die Praxis wurde die Unterscheidung so kleiner Tonstufen unbequem und man versuchte sie daher zu verschmelzen.

In dem noch jetzt herrschenden Systeme der gleichschwebenden Temperatur geschieht dieses dadurch, daß man die Octave in 12 ganz gleiche Stufen theilt, während man in den ungleichschwebenden Temperaturen, wie schon oben angedeutet wurde, nur einzelne Intervalle veränderte, um die übrigen rein zu erhalten.

Nach dem Obigen gelangt man von *C* durch 12 reine Quinten zum *His*, welches von *C* aus um das Intervall $\frac{74}{73}$ verschieden ist. Dieses ist aber etwa $^1/_5$ eines halben Tones. Ebenso kam man aber auch durch ein Zirkel von 12 Quinten von *C* aus zu *Deses*, welches wiederum um das Intervall $\frac{73}{74}$ tiefer ist als *C*. Setzt man nun *C* = *His* = *Deses* und vertheilt die kleine Abweichung von $\frac{74}{73}$ auf alle 12 Quinten jedes Zirkels gleichmäßig, so wird jede Quinte um etwa $^1/_{60}$ eines halben Tones unrein, also um ein allerdings sehr kleines Intervall. Man kann die Quinte des gleichschwebenden Systemes in möglichst kleinen Zahlen durch $\frac{3}{2} \cdot \frac{885}{886}$ ausdrücken. Die reine

Quinte *d'* — *a'* würde in der Secunde mit ihr etwa eine Schwebung geben, was nicht störend ist. Der Unterschied für die übrigen Intervalle zwischen der gleichschwebenden und pythagoräischen Stimmung ist aus folgender Tabelle ersichtlich:

	rein	gleichschwebend	pythagoräisch.
große Terz	$\frac{5}{4}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{127}{126}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{81}{80}$
kleine Sexte	$\frac{8}{5}$	$\frac{8}{5} \cdot \frac{126}{127}$	$\frac{8}{5} \cdot \frac{80}{81}$
kleine Terz	$\frac{6}{5}$	$\frac{6}{5} \cdot \frac{121}{122}$	$\frac{6}{5} \cdot \frac{80}{81}$
große Sexte	$\frac{5}{3}$	$\frac{5}{3} \cdot \frac{122}{121}$	$\frac{5}{3} \cdot \frac{81}{80}$
halbe Ton	$\frac{16}{15}$	$\frac{18}{17}$ oder $\frac{16}{15} \cdot \frac{147}{148}$	$\frac{21}{20}$ oder $\frac{16}{15} \cdot \frac{80}{81}$.

Die Terzen liegen, wie man sieht in der gleichschwebenden Temperatur den reinen näher als in der pythagoräischen, aber ihre Combinationstöne wirken sehr unangenehm. Sie liegen nämlich zwischen denen der reinen und denen der pythagoräischen Terz um weniger als einen halben Ton von denen der reinen Terz entfernt. Sie entsprechen daher keinem Ton der Scala und klingen deshalb falsch und verstimmt.

Da es überhaupt nicht möglich ist durch Quintenzirkel zu reinen Terzen zu gelangen, die Verwandtschaft der Terz zum Grundtone aber auf dem reinen Verhältnisse 4 : 5 beruht, so muß man nach Hauptmann die durch Terzen hervorgebrachten Töne von denen durch Quinten hervorgebrachten unterscheiden. Nun lassen sich aber nach Helmholtz ohne Schaden folgende Töne des Hauptmann'schen Systems identificiren

Fes = *c*
C = *h*
Ges = *fis*
Des = *cis*
As = *gis*
Es = *dis*
B = *ais*

* Vergl. Helmholtz a. a. O. p. 481.

Von dieser Bemerkung ausgehend, hat Helmholtz mit Erfolg versucht, für die Physharmonika mit zwei Manualen eine Stimmung auszuführen, bei welcher die Duraccorde von *Fes-Dur* bis *Fis-Dur* rein hergestellt werden konnten, also 15 Duraccorde und ebenso viele Mollaccorde.

Das System der temperirten Stimmung zeichnet sich durch große Einfachheit aus und hat deswegen besondere Vorzüge für die Instrumentalmusik. Indessen ist der Unterschied zwischen ihr und der reinen Stimmung nicht gering und fällt selbst wenig musikalisch gebildeten Personen auf, wenn sie Gelegenheit haben dieselbe mit reiner Stimmung zu vergleichen. Für die Noten der eingestrichenen Octave sind die Schwingungszahlen der reinen und temperirten Stimmung folgende:

	reine Verhältnißzahl	reine Tonleiter	temp. Tonleiter
c'	24	264	264
d'	27	297	296,5
e'	30	330	332,5
f'	32	352	352,5
g'	36	396	395,5
a'	40	440	444
h'	45	495	498,5
c''	48	528	528

Bei scharfen Klangfarben, wie sie z. B. die Mixturen und Zungenwerke der Orgel haben, treten die Mängel der temperirten Stimmung sehr auffallend hervor. Helmholtz sagt darüber: „Man hält es gegenwärtig für unvermeidlich, daß die Mixturregister vollständig gespielt, einen wahren Höllenlärm machen, und die Orgelspieler haben sich in ihr Schicksal gefügt. — — Wer nur einmal den Unterschied zwischen rein gestimmten und temperirten Accorden gehört hat, wird nicht zweifeln, daß es für eine Orgel der größte Gewinn wäre, wenn man die Hälfte ihrer Register, deren Unterschiede oft genug auf eine Spielerei hinausläuft striche und die Zahl der Töne innerhalb der Octave verdoppelte, um mit Hülfe passender Registerzüge in jeder Tonart rein spielen zu können.“ In dem Anhange zu seiner „Lehre von den Tonempfindungen“ hat Helmholtz dann einen vollstän-

digen Plan für reingestimmte Instrumente mit einem Manuale gegeben.

Daß selbst wenig gebildete Musiker das Bedürfniß haben reine Intervalle zu hören, zeigt die Thatsache, daß Quartettsänger, auch Dilettanten wenn sie viel mit einander geübt haben, vollkommen rein singen, namentlich jüngere Leute, die ihr Ohr hauptsächlich nach dem Gesange selbst gebildet haben und nicht an die Begleitung des Clavieres oder Orchesters gewöhnt sind.

Drittes Kapitel.

Die Lehre vom Lichte oder Optik.

1. Natur des Lichtes. — Das Licht macht uns die Körper sichtbar. Mit dieser Erklärung ist indessen weder über die Natur des Lichtes etwas ausgesagt, noch darüber ob dasselbe von den Körpern oder etwa von unserem Auge ausgehe. Der griechische Philosoph Empedokles (im 5. Jahrhundert vor Chr.) vermuthete das Letztere. Plato (429—348 vor Chr.) nahm an, daß sowohl von den Körpern als vom Auge Lichtstrahlen ausgingen und daß die Lichtempfindung erst durch das Zusammentreffen beider entstände. Sein Schüler Aristoteles (348—322 v. Chr.) behauptete, daß die Empfindung des Sehens durch die Bewegung eines feinen, zwischen dem Auge und dem gesehenen Gegenstande befindlichen Mittels erregt werde. Der nach ihm (zwischen 160 und 125 v. Chr.) lebende Astronom Hipparch näherte sich wieder der Ansicht des Empedokles, indem er sich vorstellte, daß das Sehen gewissermaßen ein Tasten (wie mit Fühlfäden) mit den vom Auge ausgehenden Lichtstrahlen sei.

Diese mehr auf philosophischen Speculationen als auf Beobachtungen gegründeten Vermuthungen enthalten neben auffallenden Irrthümern einen Kern von Wahrheit, insofern man in ihnen den Keim der modernen Anschauungen über das Wesen des Lichtes wieder findet. Ginge das Licht nur vom Auge aus, so müßten

wir denselben Körper, wenn er vor das Auge gebracht wird unter allen Umständen sehen können (also auch im Dunkeln); die Erfahrung lehrt aber daß von uns nur gewisse Körper, die selbstleuchtenden unabhängig von andern durch das Auge wahrgenommen werden können. Die übrigen werden uns nur dadurch sichtbar, daß das von den selbstleuchtenden Körpern auf ihre Oberfläche gefallene Licht von ihnen zurückgeworfen wird und so in unser Auge gelangt. In einem dunkeln Zimmer können wir uns von dem Vorhandensein der Gegenstände nur durch den Tastsinn (ausnahmsweise auch durch den Geruch oder das Gehör) Kenntniß verschaffen, bis wir sie durch ein etwa angezündetes Licht beleuchten.

Die Lichtempfindung wird wie jede Empfindung, durch Fortleitung eines auf unsere Nerven — im vorliegenden Falle auf die im Auge ausgebreiteten Sehnerven — ausgeübten Reizes zum Gehirn hervorgerufen. Die Beantwortung der Frage: auf welche Weise die Reizung der Sehnerven vor sich gehe, hängt innig mit der nach der Natur des Lichtes zusammen. Hierüber sind in neuerer Zeit zwei Annahmen gemacht. Nach der von Newton aufgestellten Emissions- oder Emanations-Hypothese gehen von den leuchtenden Körpern, ähnlich wie wir es bei den riechenden Stoffen annehmen, kleine materielle Theile aus, dringen in unser Sehorgan ein und vermitteln so die Lichtempfindung. Weil sich indessen nach dieser Annahme gewisse Erscheinungen (die Interferenzerscheinungen), welche lehren, daß unter Umständen Licht zu Licht hinzugefügt, Dunkelheit erzeugt, nicht erklären lassen, so hat man sie seit dem Anfange dieses Jahrhunderts etwa wieder verlassen und ist auf die bereits im Jahre 1690 von Huyghens aufgestellte Vibrations- oder Undulations-Hypothese zurückgegangen, nach welcher das Licht ähnlich wie der Schall auf einer Wellenbewegung beruht. Aus dieser Annahme lassen sich alle bisher bekannten Erscheinungen ungezwungen und verhältnißmäßig einfach erklären; ja sie liefert, wie wir sehen werden, auch die theoretische Basis für die Lehre von der strahlenden Wärme und läßt sich endlich am besten in Einklang bringen mit dem alle Naturerscheinungen umfassenden Princip von

der Erhaltung der Kraft. Allerdings muß man, um die Fortpflanzung des Lichtes durch den (luftleeren) Weltraum zu erklären das Vorhandensein eines besonderen gasförmigen Mediums, des Lichtäthers annehmen, welcher alle Räume erfüllt, in denen sich das Licht verbreitet. Dasselbe muß außerordentlich dünn sein, da es sonst der Bewegung der Weltkörper einen merklichen Widerstand entgegensetzen würde. Einen solchen glaubt man in der That beim Enke'schen Kometen, dessen $3^1/_3$jährige Umlaufszeit seit 1786 regelmäßig um $^1/_9$ Tag kürzer geworden ist, bemerkt zu haben.*) Vielleicht ist auch die am 19. December 1849 erfolgte Theilung des Biela'schen Kometen (der sich übrigens seitdem wahrscheinlich in einen Sternschuppenschwarm aufgelöst hat) als eine Folge des Aetherwiderstandes anzusehen. Bei den dichteren Weltkörpern, den Planeten, hat man eine ähnliche Beobachtung bisher nicht gemacht.

Wegen der außerordentlichen Geschwindigkeit, mit welcher sich das Licht fortpflanzt, ist man zu der weiteren Annahme gezwungen daß die Elasticität des Aethers sehr groß sei, da (nach Wellenlehre §. 3) die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Größe $\sqrt{\frac{e}{d}}$ proportional ist. Der Werth dieser Größe ist im

* Um sich zu erklären, wie durch ein widerstehendes Mittel die Umlaufszeit eines Himmelskörpers um die Sonne vermindert wird, muß man bedenken, daß die Bahn durch das Gleichgewicht zwischen der Attraction der Sonne und die Centrifugalkraft der Himmelskörper bestimmt ist. Letztere wird geringer, wenn die Umlaufsgeschwindigkeit durch den Widerstand des Mediums vermindert wird. Indem nun die Attraction überwiegt, findet eine Annäherung des Himmelskörpers an die Sonne statt und derselbe durchläuft nun eine engere Bahn in kürzerer Zeit, weil seine lebendige Kraft ($m v^2$) nur unbeträchtlich vermindert wird. Man veranschaulicht sich den Vorgang leicht, wenn man einen schweren Körper z. B. eine Kugel oder einen Ring an einem Faden befestigt, ihn im Kreise herumschwingt und, wenn er eine hinreichende Geschwindigkeit erlangt hat, den Faden um den Finger oder einen hingehaltenen Stab sich aufwickeln läßt. Der Körper beschreibt in diesem Falle wie der Enke'sche Komet eine Spirale und vollendet jede Windung in um so kürzerer Zeit, je mehr er sich dem Centrum der Bahn nähert.

Allgemeinen um so geringer, je größer die Dichtigkeit der Körper ist. Es geht dieses aus den Brechungserscheinungen hervor und wird auch durch directe Messung bestätigt. In dichteren Körpern muß also entweder die Elasticität des Aethers geringer oder seine Dichtigkeit größer sein.

Die Schwingungen der Aethertheilchen in einem Lichtstrahle sind ganz ähnlich denjenigen, welche die Theilchen eines langen Seiles ausführen, wenn man dasselbe (wie §. 2 der Wellenlehre näher ausgeführt ist) in Wellenbewegung versetzt hat. Die Vibrationen finden also senkrecht zur Richtung des Lichtstrahles statt. Führen alle Theilchen ihre Pendelschwingungen in derselben Ebene aus, so hat man geradlinig polarisirtes Licht, welches als das einfachste zu betrachten ist. Beschreibt jedes Theilchen eine elliptische Bahn so hat man elliptisch polarisirtes Licht, von welchem das circularpolarisirte eine besondere Art ist (vergl. Wellenlehre §. 34). Im gewöhnlichen Lichte finden die Schwingungen der Aethertheilchen zwar auch senkrecht zur Richtung des Lichtstrahles, aber in allen möglichen Ebenen statt. Die Farben unterscheiden sich nach der Vibrationshypothese in ähnlicher Weise wie die Töne durch die verschiedene Anzahl von Schwingungen (n), welche die Aethertheilchen in derselben Zeit ausführen. Die Aufeinanderfolge der Vibrationen ist eine so schnelle und demgemäß auch die Wellenlänge trotz der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes eine so geringe, daß sie nicht wie beim Schalle direct gemessen, sondern nur auf indirectem Wege durch Rechnung bestimmt werden kann. Die Wellenlänge beträgt im Mittel kaum ein halbes Tausendstel eines Millimeters.

Außer durch ihren Urheber ist die Vibrationshypothese namentlich durch Euler, Young (1800), Fresnel (1815), Fraunhofer, Cauchy, Poisson, Neumann, Schwerd u. A. weiter ausgebildet.

2. Selbstleuchtende und dunkele, durchsichtige und undurchsichtige Körper. — Zu den selbstleuchtenden gehören namentlich die glühenden und die verbrennenden Körper. In der Wärmelehre wird erwähnt werden (vergl. strahlende Wärme §. 3), daß alle Körper bei einer gewissen Temperatur

leuchtend werden, und dabei, wenn die Erhitzung mehr und mehr gesteigert wird, von Roth anfangend und mit Violett endigend Strahlen aller Farbengattungen aussenden, durch deren Vereinigung sie schließlich weißglühend erscheinen. Meistens ist mit dem Glühen eine Verbrennung verbunden. Das Licht der meisten Flammen, wie das der Kerzen-, Gas-, Petroleum-Flamme rührt von brennenden und glühenden Kohlenstofftheilchen her. Auch die Fixsterne und namentlich der für uns wichtigste derselben, die Sonne, leuchten vermöge der auf ihnen herrschenden hohen Temperatur, welche diejenige der Weißglühhitze außerordentlich übersteigt, da z. B. das Eisen in Dampfform in der Atmosphäre der Sonne enthalten ist. (Vergl. weiter unten §. 14).

Eine eigenthümliche Classe von selbstleuchtenden Körpern sind die phosphorescirenden, wie der Phosphor selbst und manche organische Substanzen, z. B. Heringsköpfe, moderndes Weidenholz 2c., wenn sie in Verwesung übergehen. Auch hier beruht das Leuchten wahrscheinlich auf einer langsamen Verbrennung, wie wenigstens für den Phosphor nachgewiesen ist, da er z. B. im Wasserstoffgase nicht leuchtet.

Manche Stoffe erhalten dadurch, daß sie eine Zeitlang von Lichtstrahlen, namentlich Sonnenstrahlen, beschienen werden, die Fähigkeit nachzuleuchten, wie u. A. Flußspat, Diamant und viele andere künstlich bereitete Verbindungen. Flußspat leuchtet wochenlang nach. Auch durch Erwärmung oder durch electrische Funken läßt sich das Nachleuchten hervorrufen; auf die letztere Art beispielsweise bei Kreide oder bei schwefliger Säure, welche dabei zu Schwefelsäure oxydirt wird. Durch Reiben stark electrisirte Körper leuchten ebenfalls. Das Licht des electrischen Funkens entsteht dadurch, daß die Luft beim Durchgange der Electricität glühend wird. Vielleicht beruht auch das bei schneller Krystallisation von Salzen zuweilen auftretende Licht auf electrischer Erregung.

Nach der Vibrationshypothese wird der Aether ebenso durch die selbstleuchtenden wie die Luft durch tönende Körper in Vibrationen versetzt. Das Nachleuchten der Körper läßt sich durch die Annahme erklären, daß die Atome der nachleuchtenden Körper,

wie es bei der Erklärung der Resonanz erörtert ist, in Mitschwingung gerathen, wenn sie von solchen Aetherwellen getroffen werden, deren Periode mit der ihrigen übereinstimmt (vergl. Akustik §. 13). In diesem Falle findet alsa eine Absorption der Lichtstrahlen statt (vergl. auch strahlende Wärme §. 4).

Dunkele Körper werfen das auf sie fallende Licht nach allen Seiten mehr oder weniger stark zurück, werden also dadurch gewissermaßen selbstleuchtend. Man kann sich von der allseitigen Verbreitung des reflectirten Lichtes überzeugen, wenn man ein dünnes Bündel Sonnenstrahlen durch eine enge Oeffnung in ein im Uebrigen dunkeles Zimmer eintreten und auf irgend einen, am besten weißen Gegenstand fallen läßt. Der letztere erleuchtet dann die übrigen im Zimmer befindlichen Gegenstände und kann selbst von allen Seiten gesehen werden. Es ist wichtig hervorzuheben, daß man jeden Punkt eines beleuchteten Körpers als einen solchen betrachten kann, der, wie ein selbstleuchtender Punkt, Strahlen nach allen Richtungen hin aussendet.

Diejenigen Lichtstrahlen, welche von einem Körper weder absorbirt noch reflectirt werden, gehen durch ihn hindurch. Ein Körper heißt durchsichtig, wenn er den größten Theil des auffallenden Lichtes hindurchläßt. In dünnen Schichten sind alle Körper, selbst die dichtesten Metalle durchsichtig. Dünne Silberhäutchen (wie sie bei Versilberung des Glases entstehen) lassen blaues, Goldhäutchen grünes Licht hindurch. Andererseits absorbiren selbst die durchsichtigsten Körper bei großer Dicke das Licht, wie man an der atmosphärischen Luft beobachten kann, wenn die Sonne dem Horizonte nahe steht. Ueberschritte die Höhe der Atmosphäre eine gewisse Grenze so würden wir also die Sterne und selbst die Sonne gar nicht sehen. Leitet man durch Linsen concentrirtes Sonnenlicht in einen durchsichtigen Körper, z. B. Wasser oder Luft, so kann man bei Abhaltung fremden Lichtes die geringsten vorhandenen Unreinigkeiten, wie Staubtheilchen, durch die an ihnen stattfindende Reflection wahrnehmen. Auf diese Weise wird bekanntlich der in der Luft schwebende Staub sichtbar, wenn Sonnenstrahlen durch Oeffnungen im Laden in ein sonst dunkeles Zimmer eintreten.

3. Geradlinige Fortpflanzung des Lichtes, Schattenbildung. Dunkele Kammer. — Ein Lichtpunkt verschwindet für das Auge, wenn man in die gerade Verbindungslinie beider einen undurchsichtigen Körper z. B. den Finger hält. Hieraus folgt, daß das Licht sich in der Luft geradlinig verbreitet. Ebenso ist es in anderen gleichförmig dichten Medien.

Aus der geradlinigen Verbreitung des Lichtes erklärt sich die Schattenbildung, sowie die Form der Schatten. Geht das Licht von einem Punkte aus, so entsteht hinter dem undurchsichtigen Körper (Schirm) ein fast vollständig dunkeler Raum (wegen der Beugung der Lichtstrahlen herrscht darin nicht vollkommene Dunkelheit) Kernschatten genannt. Gehen die Strahlen von einem leuchtenden Körper z. B. der Sonne aus, so entsteht außerdem ein Halbschatten, der allmälig in den Kernschatten übergeht. Die Begrenzung des Halbschattens sowie des Kernschattens erhält man leicht z. B. bei zwei Kugeln, wenn man sich die Durchschnittskreise beider aufzeichnet und die vier geraden Linien zieht, welche beide berühren. Durch die beiden convergirenden Berührungslinien wird der (kegelförmige) Kernschatten, durch die beiden divergirenden der Halbschatten begrenzt. Bei Mondfinsternissen tritt der Mond in den Kernschatten der Erde, und man sieht dann die kreisförmige Begrenzung desselben auf der Mondoberfläche.

Der Schatten eines senkrechten Stabes fällt morgens nach Westen, mittags nach Norden, abends nach Osten. Bekanntlich beruhen auf dieser Bewegung des Schattens die Sonnenuhren. Wir erwähnen noch die Schattenspiele, sowie die Benutzung des Schattens zur Herstellung von Silhouetten und zur Umwandlung der negativen Photographien in positive, endlich zur Bestimmung der Lichtstärke, worüber weiter unten das Nähere gesagt werden wird.

Fällt Sonnenlicht durch eine Oeffnung im Laden in ein sonst dunkeles Zimmer, so wird auf der gegenüberliegenden Wand eine Stelle erhellt, deren Begrenzung im Allgemeinen durch die Form der Oeffnung bestimmt ist. Ist die letztere aber sehr klein, so entsteht allemal ein runder heller Fleck, welches auch die Form der Oeffnung sein mag. Dergleichen helle Flecke beob-

achtet man oft in schattigen Lauben, wenn Sonnenstrahlen durch enge Oeffnungen zwischen den Blättern den Boden erreichen. Bei partiellen Sonnenfinsternissen erscheinen sie sichelförmig. Es sind also Bilder der Sonne. Ebenso erblickt man in dunkeln Hausräumen auf den Wänden zuweilen verkehrte Bilder der hellen Fenster von angrenzenden Zimmern, wenn die Lichtstrahlen von denselben durch ein Schlüsselloch ihren Weg zur betreffenden Stelle gefunden haben.

Zur Erklärung der Erscheinung bemerken wir, daß ein Bild immer dann entsteht, wenn Lichtstrahlen, welche von einem Punkte ausgehen, auch wieder genau oder wenigstens nahezu in einen Punkt vereinigt werden. Letzteres wird beim Durchgange durch eine kleine Oeffnung der Fall sein, wie auch die Form derselben sein mag. Hat man z. B. eine dreieckige Oeffnung, so wird die von einem leuchtenden Punkte erhellte Stelle allerdings ebenfalls die Form eines kleinen Dreieckes haben; beschreibt nun aber der leuchtende Punkt irgend eine Linie, z. B. eine senkrechte Gerade, so wird die erhellte Stelle, sich in entgegengesetzter Richtung bewegend, einen Streifen von geringer Breite durchlaufen, dessen Ränder aber geradlinig begrenzt sind, und dieses wird bei jeder beliebigen Form der Oeffnung der Fall sein. Die verkehrte Lage der Bilder erklärt sich nach dem Obigen durch die Kreuzung der Strahlen in der Oeffnung. Wegen der geringen Ausbreitung der Strahlen erscheinen die Bilder etwas verschwommen. Scharf begrenzt erhält man sie nur, wenn man in die Oeffnung eine Sammellinse zur genaueren Vereinigung der Strahlen einsetzt.

4. Lichtintensität und Beleuchtung. Abnahme beider mit der Entfernung. Bestimmung der Lichtstärke. — Nach dem in §. 12 der Wellenlehre entwickelten allgemeinen Gesetze nimmt die Lichtintensität quadratisch mit der Entfernung ab. Dasselbe Gesetz gilt für die Beleuchtung. Diese wird gemessen durch die Menge der auf die Einheit der Fläche fallenden Lichtstrahlen. Ist letztere in der Einheit der Entfernung gleich a, so ist sie also in der $x$fachen Entfernung x^2 mal so klein, so daß die Gleichung gilt

$$J = \frac{a}{x^2}$$

wenn man unter J die in der Entfernung x stattfindende Beleuchtung versteht. Die Richtigkeit dieses Gesetzes leuchtet sofort ein, da, wenn die Entfernung 2, 3, ꝛc. x mal größer wird, die Fläche, auf welche sich dieselbe Strahlenmenge ausbreitet bezw. 4, 9, · · · x^2 mal so groß wird. Von dem etwa in dem Fortpflanzungsmedium absorbirten Lichte ist hierbei Abstand genommen.

Abgesehen von der Menge der auffallenden Strahlen spielt auch der Winkel, unter welchem eine beleuchtete Fläche gegen dieselben geneigt ist, bei der Beleuchtung eine Rolle. Je kleiner der letztere ist, auf einen desto größeren Raum breitet sich dieselbe Strahlenmenge aus, desto schwächer wird also auch die Beleuchtung sein.

Je stärker ein Gegenstand beleuchtet ist, desto heller erscheint er uns im allgemeinen; doch hängt der Grad der Helligkeit, insofern diese durch die Menge der in unser Auge zurückgeworfenen Strahlen bedingt ist, wesentlich von dem Reflectionsvermögen des Körpers und dem Orte unseres Auges ab. Bei gleicher Beleuchtung werden also zwei Flächen nur dann gleich hell erscheinen, wenn ihr Reflectionsvermögen und ihre Neigungen sowohl gegen die Strahlen als gegen das Auge gleich sind.

Zur Vergleichung der Lichtstärke zweier Lichtquellen, z. B. einer Kerze und einer Petroleumlampe, bedient man sich, wenn es nicht auf größere Genauigkeit ankommt, am einfachsten eines von Lambert (1760) angegebenen Verfahrens, welches auf der Vergleichung der von den beiden Lichtquellen hervorgerufenen Schatten beruht.

Man stellt zu diesem Zwecke vor eine weiße Tafel einen Stab und rückt die hellere Lichtquelle so weit ab, bis beide Schatten gleich dunkel erscheinen. Da jeder Schatten nur von einer Lichtquelle erleuchtet wird, so müssen in diesem Falle auch die beiden auf die Tafel geworfenen Lichtmengen gleich sein. Ist nun z. B. die Entfernung des helleren Lichtes 2 mal so groß, so ist seine Intensität nach dem obigen Gesetze 4 mal so groß;

im allgemeinen ist sie n^2 mal so groß, wenn die bezüglichen Entfernungen von der Tafel sich wie 1 : n' verhalten. Sehr einfach und ziemlich genau kann man nach Bunsen den Punkt der gleich starken Beleuchtung bei zwei Lichtquellen auch herausfinden, wenn man ein mit einem Oelflecke versehenes Papier in der Verbindungslinie beider so lange verschiebt, bis man den Flecken von keiner Seite sieht

Wegen der schnellen Abnahme der Lichtstärke mit der Entfernung muß man, wenn es sich um gleichmäßige Beleuchtung größerer Räume, z. B. der Straßen, handelt, mehrere Lichtquellen in nicht zu großen Abständen gleichmäßig vertheilen; ein einziger intensiver Lichtpunkt würde in der Nähe zu große, in der Entfernung zu geringe Helligkeit verbreiten. Auch würde in diesem Falle die Schärfe des Schatten sehr störend wirken.

5. Ebene Spiegel. Reflectionsgesetz. — Man versteht unter einem ebenen Spiegel eine ebene Fläche, welche das Licht reflectirt. Fällt ein Lichtstrahl auf eine solche, so wird er nach dem in §. 12 der Wellenlehre erklärten Gesetze so zurückgeworfen, daß der reflectirte Strahl mit der Spiegel-Ebene denselben Winkel bildet wie der auffallende. Errichtet man sich auf der Spiegelebene in einem Punkte, welcher von einem auffallenden Lichtstrahle getroffen wird, ein Loth, das Einfallsloth, so halbirt dieses den Winkel zwischen dem auffallenden und dem reflectirten Strahle und liegt mit ihnen in derselben, zum Spiegel senkrechten Ebene, welche die Reflectionsebene genannt wird. Senkrecht auffallende Strahlen werden demnach in sich selbst zurückgeworfen. Bildet der auffallende Strahl, also auch der reflectirte, mit dem Lothe einen Winkel von 45⁰, so stehen beide auf einander senkrecht. Dreht man den Spiegel mit seinem Einfallsloth um irgend einen Winkel x, so dreht sich der reflectirte Strahl um den Winkel $2x$. In einem verdunkelten Zimmer läßt sich mit Hülfe von Sonnenlicht oder electrischem Licht der Weg, sowohl des auffallenden wie des reflectirten Strahles an den erleuchteten Staubtheilchen leicht sichtbar machen. Um einem reflectirten Sonnenstrahle eine ganz bestimmte Richtung zu geben, bedient man sich der Heliostatenspiegel. Dieselben sind

um zwei sich kreuzende Axen drehbar, so daß man sie in eine beliebige Lage bringen kann. Man gibt ihnen entweder mit der Hand die gewünschte Richtung oder setzt sie mit einem Uhrwerke in Verbindung. Fällt die Hauptdrehungsaxe des Spiegels in die Richtung der Weltaxe, so kann man durch eine passende Neigung des Spiegels um seine zweite Axe es leicht bewirken, daß die reflectirten Strahlen ebenfalls zur Weltaxe stets parallel sind, wenn man das Uhrwerk so construirt, daß der Spiegel in derselben Zeit wie die Erde, also in 24 Stunden, eine Umdrehung macht, so daß er der scheinbaren Bewegung der Sonne folgt.

Fallen von einem leuchtenden Punkte A verschiedene Lichtstrahlen, etwa AB, AB', AB'' ꝛc. auf einen ebenen Spiegel, so findet man die zugehörigen reflectirten Strahlen am einfachsten, wenn man von A aus ein Loth AT auf die Spiegelebene (oder ihre Verlängerung) fällt, dieses um sich selbst, bis A' verlängert und über A' B', (A') B'' ꝛc. gerade Linien zieht. Diese Linien bilden, wie man leicht aus der Congruenz der entstandenen Dreiecke erkennt, dieselben Winkel mit der Ebene des Spiegels wie die auffallenden Strahlen. Die von einem Lichtpunkte auf einen ebenen Spiegel fallenden Strahlen werden also von demselben so zurückgeworfen, als kämen sie alle von einem Punkte (A'), welcher ebenso weit hinter dem Spiegel liegt, wie der leuchtende Punkt (A) selbst vor dem Spiegel. Befindet sich nun seitwärts von A ebenfalls vor dem Spiegel, etwa im Punkte O, das Auge eines Beobachters, so scheint diesem nach dem auf pag. 207 angeführten allgemeinen physiologischen Gesetze in A' ebenfalls ein Lichtpunkt vorhanden zu sein. Dieser Punkt A' wird das Spiegelbild des Punktes A genannt. Wir haben es in diesem Falle mit einem subjectiven oder geometrischen Bilde zu thun, weil es nicht im Vereinigungspunkte der Lichtstrahlen selbst, sondern ihrer Verlängerungen erscheint, und sich daher nicht, wie die durch Linsen- und Hohlspiegel hervorgerufenen Bilder, auf einem Schirm auffangen läßt.

Wird ein Spiegel von solchen Strahlen getroffen; welche

nach einem hinter demselben gelegenen Punkte *A'* hin convergiren, so vereinigen sich die reflectirten Strahlen in einem Punkte *A*, welcher ebenso weit vor dem Spiegel liegt, wie *A'* hinter demselben. Von diesem Satze macht man mehrfach Anwendung, wenn es sich darum handelt, die Lage eines Bildes zu verändern, z. B. bei der camera obscura und beim Spiegelteleskop.

Auch von leuchtenden und beleuchteten Körpern, welche man als aus leuchtenden Punkten zusammengesetzt ansehen kann, entstehen Spiegelbilder. Denken wir uns, um den einfachsten Fall zu erklären, eine leuchtende gerade Linie *AB* vor einem Spiegel. Um ihr Bild zu finden, darf man nur von den Endpunkten *A* und *B* die beiden Lothe *AS* und *BT* auf die Spiegelebene fällen, diese um sich selbst bis *A'* und *B'* verlängern und die letzteren Punkte verbinden, so ist die Verbindungslinie *A' B'* das Spiegelbild von *AB*. Steht *AB* auf dem Spiegel senkrecht, so liegt das Bild *A' B'* in der Verlängerung von *AB*. Bildet *AB* mit dem Spiegel einen Winkel von 45°, so ist der Winkel zwischen *AB* und *A'B'* gleich einem Rechten. Ueberhaupt haben Bild und Gegenstand zum Spiegel stets eine symmetrische Lage. Man muß daher auch einen Fensterspiegel um 45° gegen die Richtung der Straße neigen, wenn man von der Stube aus die Länge derselben im Bilde übersehen will. Befestigt man in einer äußerlich einem Fernrohr ähnlichen cylindrischen Hülse, welche eine seitliche Oeffnung hat, einen unter 45° gegen ihre Axe geneigten Spiegel, so kann man mit einem solchen Instrumente, während man scheinbar der Länge nach hindurchsieht, die seitwärts von demselben befindlichen Gegenstände überblicken, also ähnlich wie bei einem Fensterspiegel um die Ecke sehen. Aehnlich wirkt auch der Spiegel eines Guckkastens.

Ist ein Spiegel begrenzt, etwa durch einen Rahmen, so ist dadurch auch die Ausdehnung der Bilder, welche man von einem gewissen Punkte aus überblicken kann, beschränkt. Sieht man z. B. in einen an der Wand hängenden Spiegel, so sieht man gerade so viel von den abgespiegelten Gegenständen, als befände sich an der Stelle des Spiegels eine ebenso große Oeffnung in der Wand und an der Stelle der Bilder die Gegenstände selbst.

Hiernach erkennt man leicht, daß wenn man einen Gegenstand z. B. seine eigene Gestalt im Spiegel ganz überblicken will, der letztere wenigstens die halbe Höhe des Gegenstandes haben muß. Außerdem muß er natürlich in die passende, vom Orte des Auges abhängige Lage gebracht werden.

Dreht man einen Spiegel um eine in seiner eigenen Ebene gelegene Axe CC', so beschreibt das Bild eines vor demselben befindlichen Lichtpunktes A einen Kreis, dessen Radius CA ist, und zwar ist der von dem Bilde durchlaufene Bogen nach dem Früheren doppelt so groß, als der Drehungswinkel des Spiegels, so daß wenn letzterer z. B. 45^0 beträgt das Bild einen Viertelkreis durchlaufen hat. Der König'sche Drehspiegel zur Flammenanalyse (Akustik §. 10) bietet hiervon eine Anwendung. Man kann auf diese Weise die geringsten Bewegungen eines Spiegels erkennen, wenn man die Bilder hinreichend weit entfernter Lichtpunkte in demselben beobachtet. So erklärt sich das Tanzen der Bilder in einem Toilettenspiegel, wenn letzterer auch nur ein wenig hin und her schwankt. Man hat diese Erscheinung in sehr sinnreicher Weise verwerthet, um die kleinsten Bewegungen schwingender Körper, z. B. der Magnetnadeln sichtbar zu machen und genau zu messen, indem man kleine Spiegel mit ihnen in Verbindung brachte und in diesen das Bild eines davor aufgestellten Maßstabes vermittelst eines Fernrohrs beobachtete. Es ist dieses das Princip der von Gauß und Poggendorff erfundenen Spiegelablesung, welche als eins der wesentlichsten Hülfsmittel der neueren Beobachtungskunst anzusehen ist. Sie findet etwas modificirt u. A. Anwendung bei dem transatlantischen Telegraphen, dessen Nadeln mit kleinen Spiegeln versehen sind, von welchen man ein Bündel Lichtstrahlen auf eine Scala reflectiren läßt. Dadurch werden die Bewegungen jener winzig kleinen Nadeln sehr deutlich sichtbar.

Da im Allgemeinen jeder feste, auch luftförmige, flüssige Körper die Fähigkeit besitzt, in stärkerem oder geringerem Maße das Licht zu reflectiren, so wird jeder derselben als Spiegel wirken, wenn er nur eine ebene Oberfläche hat. Einen natürlichen und zugleich sehr vollkommenen Spiegel bildet die Oberfläche

ruhender Flüssigkeiten. Zu wissenschaftlichen Zwecken wird in dieser Hinsicht namentlich das Quecksilber benutzt. Ein solcher Flüssigkeitsspiegel läßt sich u. A. sehr bequem zur annähernden Abmessung der Höhen von Bäumen, Gewölben und dergl. benutzen. Man stellt zu diesem Zwecke eine Schale mit irgend einer Flüssigkeit auf die Erde und nimmt eine solche Stellung ein, daß man das Spiegelbild des Punktes sieht, dessen Höhe man bestimmen will. Ist nun die Höhe des Auges bekannt, werden ferner die horizontalen Entfernungen des Beobachters und des Gegenstandes, dessen Höhe man bestimmen wollte, von dem Spiegel gemessen, so läßt sich die gesuchte Höhe vermittelst einer einfachen Proportion finden.

Die besten Spiegel, welche man vorzugsweise zu wissenschaftlichen Zwecken verwendet, sind die Metallspiegel, wie sie namentlich von Stahl, Silber oder dem sogenannten Spiegelmetall (einer Composition aus Kupfer und Zinn) angefertigt werden. Sie haben vor den Glasspiegeln, abgesehen davon, daß sie bei guter Politur hellere Bilder liefern, den großen Vorzug, daß bei ihnen nur *eine* spiegelnde Fläche vorhanden ist. Bei den gewöhnlichen Glasspiegeln findet nämlich eine zweifache Reflection, sowohl an der vorderen unbelegten Fläche, als auch an der hinteren belegten statt. Letztere liefert das Hauptbild, neben demselben bemerkt man aber namentlich bei dicken Spiegeln ein zweites schwächeres Bild, welches nur wegen seiner geringeren Helligkeit und weil es für uns gewöhnlich kein Interesse hat dasselbe wahrzunehmen (vergl. Akustik pag. 243), häufig übersehen wird. Die Metallbelegung, deren Oberfläche also eigentlich auch bei den Glasspiegeln wirksam ist, besteht entweder aus Zinnfolie und Quecksilber oder wird durch Versilberung des Glases hergestellt. Dergleichen Glassilberspiegel findet man jetzt häufig im Handel, da man sie in neuester Zeit sehr vollkommen und wenn die Silberfläche mit einem Lack überzogen wird, auch haltbar herzustellen gelernt hat. Man hat die Glasversilberung mit gutem Erfolge zur Herstellung von Hohlspiegeln für Spiegelteleskope benutzt, indem man gläserne Hohlspiegel auf der *Vorderseite* versilberte. Allerdings muß der Silberüberzug öfter er-

neuert werden, da er bald durch Oxydation an Glanz verliert und sich wegen seiner äußerst geringen Dicke nicht oft polieren läßt.* Will man die Dicke des Glases bei einem gewöhnlichen Glasspiegel bestimmen, so berührt man mit irgend einem Gegenstande, z. B. einer Federspitze die Oberfläche desselben und schätzt den Abstand ihres Bildes nach dem Augenmaße. Dieser Abstand gibt dann die doppelte Dicke an. Um zu prüfen, ob die Oberfläche eben ist, beobachtet man die Bilder von etwas entfernten hellen Gegenständen, am besten solchen mit geradlinigen Kanten. Letztere dürfen nicht gekrümmt erscheinen. Auch die Farbe des Glases ist für die Güte des Spiegels nicht ganz unwesentlich. Man gibt bei Toilettenspiegeln einem Glase mit etwas röthlichem Tone häufig den Vorzug. Bläuliches oder grünliches läßt das Gesicht bleich erscheinen.

Zuweilen benutzt man auch die Spiegelung an unbelegten Glasscheiben, da diese, wenngleich sie schwächere Bilder hervorrufen, wegen ihrer Durchsichtigkeit die Möglichkeit gewähren, neben dem Spiegelbilde auch die hinter der Scheibe befindlichen Gegenstände zu sehen. Mit Hülfe einer solchen Spiegelscheibe kann man u. A. Zeichnungen copiren. Man stellt zu diesem Zwecke die Scheibe, welche in einem passenden Stativ befestigt ist, in senkrechter Lage auf das Papier, legt dann die Zeichnung, welche man copiren will davor, so jedoch, daß sie möglichst stark beleuchtet wird, und folgt den Conturen des Spiegelbildes mit dem Zeichenstifte, den man durch das Glas hindurch ebenfalls sehen kann. Derselbe einfache Apparat läßt sich auch zu Versuchen über Farbenmischungen benutzen. Man legt zu diesem Behufe z. B. zwei verschiedenfarbige Oblaten so hin, daß das Bild der einen mit der andern direct gesehenen zusammenfällt.

In großem Maßstabe hat man die Bilder von dergleichen unbelegten Spiegeln benutzt um auf der Bühne Geistererscheinungen hervorzurufen, wozu sie allerdings wegen ihres luftigen Aus-

* Foucault hat den Versuch gemacht, durch Versilberung des Objectivglases eines großen astronomischen Fernrohres zu Sonnenbeobachtungen das Eindringen der Wärmestrahlen zu verhindern und zugleich die Lichtintensität zu schwächen. Die Silberschicht läßt nur blaues Licht hindurch.

sehens sehr geeignet sind. Eine sehr große Spiegelscheibe wird zu diesem Zwecke im Vordergrunde der Bühne, etwas nach vorne hin geneigt, so aufgestellt, daß die Bilder der Acteure, welche sich vor derselben in einer (schwarz ausgeschlagenen) Vertiefung befinden, von dem Zuschauer gesehen werden können, und über die Bühne zu schweben scheinen, wenn die Personen, von denen sie herrühren sich bewegen. Die letzteren werden dabei durch electrisches Licht beleuchtet und sind zur Erhöhung des Glanzes der Bilder gewöhnlich hell gekleidet. Wesentlich zur Erlangung des Effectes ist, daß außerdem kein reflectirtes Licht wahrgenommen wird, da dieses den Spiegel sichtbar machen würde. Der Zuschauerraum muß daher vollkommen dunkel sein. Auch darf die Bühne, auf welcher man neben den Bildern die anderen Schauspieler sieht, nur schwach beleuchtet sein. Man erhält eine allerdings schwache Vorstellung von dem zu erlangenden Effecte, wenn man an die Bilder denkt, welche selbst durch gewöhnliche Fensterscheiben von den Gegenständen eines hell erleuchteten Zimmers hervorgebracht werden und die man beobachten kann, wenn man Abends gegen die dunkele Straße hin sieht.

Winkelspiegel. — Sind zwei ebene Spiegel unter einem Winkel gegen einander geneigt, und man bringt einen Gegenstand zwischen dieselben, so entsteht von diesem nicht nur in jedem Spiegel ein Bild, sondern durch jedes derselben wird in dem anderen Spiegel wieder ein neues Bild hervorgerufen u. s. f. Alle Bilder liegen dabei mit dem Gegenstande selbst symmetrisch auf einem Kreise vertheilt, dessen Radius gleich dem Abstande des Gegenstandes von der Durchschnittslinie der beiden Spiegel ist. Bilden die beiden Spiegel einen rechten Winkel mit einander, so entstehen drei Bilder, so daß man den Gegenstand im Ganzen viermal sieht. Sind die Spiegel unter einem Winkel von 60° gegen einander geneigt, so theilt sich der ganze Kreis in sechs Fächer und in jedem derselben sieht man den Gegenstand einmal. Stellt man die Spiegel auf irgend ein Muster, so entsteht auf diese Weise immer eine regelmäßige sechstheilige Rosette. Im Allgemeinen entstehen immer so viele Fächer also auch Bilder, als der Winkel der beiden Spiegel in dem ganzen

Kreisumfange enthalten ist. Die Zahl der Bilder ist daher um so größer, je kleiner der Winkel ist. Sind die Spiegel paralell, so müßte eigentlich eine unendlich große Zahl von Bildern entstehen, und in der That erblickt man bei hellen Gegenständen z. B. Kerzenflammen eine lange Reihe derselben, doch werden die folgenden immer lichtschwächer, bis sie endlich für die Wahrnehmung verschwinden.

Eine sinnreiche Anwendung der Winkelspiegel bietet das von Brewster erfundene Kaleidoskop. Den Haupttheil desselben bieten drei gleich breite Streifen von Spiegelglas, welche zu einem dreiseitigen Prisma zusammengesetzt und in eine Röhre gefaßt sind. An dem einen Ende, zwischen zwei zur Basis des Prismas parallelen Glasscheiben befinden sich bunte Glasstückchen als Objecte für die Spiegelbilder. Letztere bieten einen stets wechselnden und doch regelmäßigen Anblick, wenn man die Röhre dreht.

Bekanntlich benutzt man die Winkelspiegel auch bei Schaufenstern, in Verkaufsläden ꝛc., um die Zahl der ausgestellten Gegenstände scheinbar zu vervielfältigen und die Anordnung derselben symmetrisch erscheinen zu lassen.

Um im Kriege hinter einer Schanze gedeckt das Vorterrain überblicken zu können, wendet man ein hohes Gestell mit zwei parallelen Spiegeln an, welche unter einem Winkel von 45° gegen den Horizont geneigt sind, so daß der obere, dem Feinde zugekehrte über die Brüstung hervorragt, während in dem untern das durch zweimalige Reflection hervorgerufene Spiegelbild erblickt wird. Auch der Heliotrop von Gauß, durch welchen man Lichtsignale (Sonnenblitze) bis auf sieben Meilen Entfernung senden kann, beruht auf dem Princip des Winkelspiegels. Auch dieses Instrument, welches bisher nur zu geodätischen Messungen verwendet wurde, läßt sich im Kriege zur optischen Telegraphie benutzen und ist zu diesem Zwecke neuerdings von italienischen und französischen Ingenieuren warm empfohlen. Es ist dazu um so geeigneter, als man an Orten, welche zwischen den correspondirenden Stationen liegen, von den Signalen nichts bemerkt.

Weitere Anwendungen der zu einander geneigten Spiegel bieten der Spiegelsextant und die ausschließlich sogenannten

„Winkelspiegel". Letztere, zwei unter 45° geneigte Spiegel, dienen den Feldmessern zum Abstecken rechter Winkel. Der erstere, welcher von Newton erfunden ist, wird vorwiegend von Seefahrern zur Winkelmessung, z. B. zur Ermittelung von Sonnenhöhen benutzt. Bei ihm ist der eine Spiegel drehbar und es kann der Winkel, welchen er mit den andern bildet an einer Kreistheilung sehr genau abgelesen werden. Der zweite kleinere Spiegel, welcher eine unveränderliche Lage hat, ist im oberen Theile unbelegt, so daß man hindurchsehen kann. Will man nun den Winkelabstand zweier Gegenstände z. B. von Sonne und Horizont bestimmen, so visirt man über den festen Spiegel nach dem einen direct und dreht den beweglichen Spiegel so lange bis das Bild des zweiten Gegenstandes in dem halbbelegten Spiegel sich mit dem ersten direct gesehen deckt. Dann ist der gesuchte Winkel doppelt so groß, wie derjenige, welchen die beiden Spiegel mit einander bilden. Das Instrument heißt Sextant, weil die Theilung zur Ablesung der Winkel sich gewöhnlich nur über den 6. Theil des Kreises erstreckt.

Durch vier Spiegel, von denen zwei mit einander einen rechten Winkel bilden, die beiden andern zu je einem von ihnen parallel gestellt sind, kann man bewirken, daß ein Lichtstrahl viermal umgelenkt wird, also z. B. um einen undurchsichtigen Schirm gewissermaßen herumgeht. Faßt man die Spiegel in eine zweimal rechtwinklig umgebogene Röhre, so kann man ein Instrument herstellen, mit welchem man scheinbar durch ein Brett hindurch zu sehen vermag, wenn man dasselbe in die eine Einbiegung der Röhre hineinhält. Von demselben Princip hat Helmholtz eine sinnreiche Anwendung bei seinem Telestereoscop gemacht. Davon weiter unten.

Hohlspiegel oder Concavspiegel. — Unter einem Hohlspiegel versteht man einen kreisförmig begrenzten Theil einer Kugeloberfläche, welche auf der inneren Seite spiegelnd gedacht wird. Einfache Hohlspiegel bieten passend gekrümmte (auf der Rückseite geschwärzte) Uhrgläser oder auch die hohle Oberfläche von concaven Linsen, z. B. Brillengläsern dar.*

* Das Verständniß der optischen Gesetze wird wesentlich durch die Anstellung eigener Versuche erleichtert, welche sich nach den im Text gegebenen

Der Hohlspiegel bringt nur von solchen Gegenständen, die man ganz in der Nähe seiner Oberfläche hält, Bilder hervor, welche wie die der ebenen Spiegel hinter der Oberfläche zu liegen scheinen. Doch sind sie vergrößert und werden von jedem Beobachter an einer andern Stelle gesehen, erscheinen auch, namentlich, wenn man sie etwas von der Seite betrachtet, etwas verzerrt. Es schneiden sich hier nämlich die reflectirten Strahlen nicht genau in einem Punkte, auch wenn sie von einem solchen ausgegangen sind, sondern in einer krummen Linie, sogenannten Brennlinie. Man sieht solche Linien häufig auf dem Boden von Tassen, wenn das Licht schräge einfällt; sie haben fast die Form eines 3. Nur, wenn die Strahlen unter einem sehr spitzen Winkel mit dem Radius der Kugel auffallen, findet der Durchschnitt der rückwärts verlängerten reflectirten Strahlen in einem Punkte statt, der daher nahe der mittleren Spitze der Brennlinie liegt. Die Bilder weiter entfernter Gegenstände liegen stets vor dem Spiegel in der Luft und haben eine in Bezug auf den Gegenstand entgegengesetzte Lage, so daß oben und unten, rechts und links vertauscht erscheint; auch unterscheiden sie sich wesentlich von den Bildern des ebenen Spiegels dadurch, daß sie sich auf einen Schirm (z. B. einen schmalen Streifen Papier) auffangen lassen, weil sie durch den Durchschnitt der Lichtstrahlen selbst entstehen. Man nennt dergleichen Bilder objective oder reelle.

Die genauere Einsicht in die Gesetze des Hohlspiegels läßt sich nur mit Hülfe einer einfachen geometrischen Betrachtung gewinnen. Man schlage sich um einen Halbmesser von 4^{cm} Länge einen ca. 30^{cm} langen Kreisbogen, welcher den Durchschnitt der Spiegelfläche mit der Ebene der Zeichnung darstellen soll, und ziehe durch die Mitte desselben, S und den Mittelpunkt M eine

---

Andeutungen leicht ausführen lassen. Ein Hohlspiegel sowie Linsen (Brillengläser) und Prisma sind für einen geringen Preis in jedem optischen Magazin zu haben, wenn man sich nicht mit noch einfacheren Hülfsmitteln begnügen will. Im Uebrigen verweisen wir Leser, welche eine genauere Anleitung zur Anstellung eigener Versuche wünschen, auf die vortreffliche „Vorschule der Experimentalphysik“ von A. F. Weinhold.

gerade Linie *SM*, die man etwa noch zweimal so weit über *M* hinaus verlängert. Diese Linie heißt die Axe des Spiegels, weil, wenn man den Kreisbogen um dieselbe herumdreht, er die Spiegelfläche beschreibt. In einem seitlichen Abstande von ca. 1^{cm} von der Axe ziehe man eine zu derselben parallele Linie *LN*, welche den Spiegel im Punkte *N* schneidet, und wie die Axe selbst einen Lichtstrahl darstellen soll. Um den zugehörigen reflectirten Strahl zu finden, ziehe man den Radius *MN* (dieser steht bekanntlich auf der Tangente resp. der Tangenten-Ebene senkrecht, er kann daher als das Einfallsloth betrachtet werden) und trage den Winkel *LNM* auf der andern Seite von *MN* nochmals an. Man wird finden, daß der reflectirte Strahl die Axe in einem Punkte *F* durchschneidet, welcher sehr nahe der Mitte von *SM* liegt, also um die Hälfte des Radius vom Spiegel entfernt ist. Dieser Punkt, nach welchem alle nahe der Axe und parallel zu derselben den Spiegel treffende Strahlen reflectirt werden, heißt der Brennpunkt oder Focus; seine Entfernung vom Spiegel, die Brennweite. Man findet die Lage des Brennpunktes leicht, wenn man den Spiegel senkrecht gegen die Sonne oder ein entferntes Licht hält und mit Hülfe eines Papierstreifens, welchen man in den reflectirten Lichtkegel bringt, den durch seine Helligkeit leicht kenntlichen Vereinigungspunkt der Strahlen aufsucht. Da mit den Lichtstrahlen auch unsichtbare Wärmestrahlen (vergl. „strahlende Wärme" §. 3) in dem Focus vereinigt werden, so entsteht in demselben nicht nur große Helligkeit, sondern auch eine hohe Temperatur.

Um nun die Lage und Größe der Bilder leuchtender Gegenstände zu finden, errichte man sich im Punkte *A* der Axe, der etwa zwei Radien vom Spiegel entfernt sei, ein Loth *AB* bis zur Linie *LN*, welche eine leuchtende Linie, das einfachste Lichtobject vorstellen möge. Man ziehe ferner durch den Mittelpunkt *M* den Strahl *BM* und verlängere ihn bis zum Spiegel; er wird wie jeder durch den Mittelpunkt gehende Strahl in sich selbst zurückgeworfen und schneidet den durch den Focus reflectirten Strahl *MF* welcher ebenfalls von *B* ausgegangen war, im Punkte *b*. Hier ist das Bild des Punktes *B*, während das Bild der ganzen

Linie *BA* durch ein von *b* aus auf die Axe gefälltes Loth *ba* dargestellt wird. Denkt man sich das Lichtobject *AB* auf der Axe parallel zu sich selbst fortbewegt, so rückt der Punkt *b* auf der Linie *NF* dem Focus *F* näher; das Loth *ba* wird immer kleiner und zieht sich zuletzt in dem Punkt *F* zusammen, wenn *AB* in unendliche Entfernung rückt. Nähert sich umgekehrt *AB* dem Centrum *M* so rückt ihm das Bild *ab* entgegen und wird größer. Im Centrum selbst liegt es gerade unter *AB* und hat dieselbe Größe. Denkt man sich an Stelle des Bildes *ab* einen leuchtenden Gegenstand, so ist *AB* sein Bild. Hiernach hat man folgende Gesetze:

Das Bild eines hinter dem Mittelpunkt *M* liegenden leuchtenden Gegenstandes liegt stets zwischen dem Focus und dem Mittelpunkte, ist umgekehrt und verkleinert, und zwar um so mehr, je weiter sich der Gegenstand entfernt. Befindet sich dagegen das Lichtobject zwischen dem Focus und dem Centrum, so liegt sein Bild hinter demselben, ist umgekehrt, aber vergrößert, und entfernt sich um so weiter, je mehr sich der Gegenstand dem Focus nähert.

Mit Hilfe einer Lichtflamme und eines Papierschirmes kann man die vorstehenden Gesetze leicht experimentell prüfen.

Da in dem Mittelpunkte Bild und Object zusammenfallen, so kann man die Lage desselben sehr einfach ermitteln, indem man z. B. das Bild einer Kerzenflamme auf einer Papierstreifen wirft und sich mit demselben dem Spiegel so lange nähert, bis man das Zusammentreffen mit dem Bilde bemerkt. Befindet sich der Gegenstand zwischen dem Focus und dem Spiegel in der halben Brennweite, so schneiden sich die beiden von *B* ausgehenden Strahlen, deren einer durch den Brennpunkt, der andere durch das Centrum reflectirt wird, nicht vor dem Spiegel, divergiren vielmehr. Der Schnittpunkt ihrer Rückverlängerungen, das geometrische Bild von *B*, liegt also hinter dem Spiegel. Fällt man von *B'* ein Loth *B'A'* auf die Axe, so stellt dieses das geometrische Bild von *BA* vor, das, wie schon oben erwähnt wurde, aufrecht und vergrößert ist; es wird um so

größer, und rückt um so weiter hinter die Spiegelfläche, je mehr sich der Gegenstand dem Focus nähert. Da die vom letzteren Punkte ausgehenden Strahlen nach der Reflection vom Spiegel parallel sind, sich also nicht schneiden, so kann, wenn der Fußpunkt des Gegenstandes sich im Focus befindet, kein Bild entstehen.

Zwischen der Entfernung (x) eines Lichtpunktes (resp. Lichtobjectes) vom Spiegel und derjenigen seines Bildes von demselben (y) existirt eine sehr einfache Beziehung; es ist nämlich stets

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

oder:

$$y = \frac{x\,f}{x - f}$$

wo f die Brennweite bezeichnet. Nach dieser Gleichung kann man y für jeden gegebenen Werth von x leicht berechnen. Nehmen wir an, daß x eine Anzahl (n) von Brennweiten betrage, setzen also in die obige Gleichung $x = n\,f$, so ergibt sich

$$y = \frac{n}{n-1} f.$$

Setzt man hier der Reihe nach

$$n = 2,\ 3,\ \cdots\ 10,\ 100 \text{ ꝛc.}$$

so erhält man entsprechend

$$y = 2f;\ \frac{3}{2} f \cdots \frac{10}{9} f;\ \frac{100}{99} f \text{ ꝛc.}$$

Der erste Werth bestätigt, daß im Mittelpunkt Bild und Object zusammenfallen; aus der Vergleichung der folgenden Werthe ersieht man, in welcher Weise sich das Bild dem Brennpunkte nähert, wenn die Entfernung des Gegenstandes (gemessen durch eine Anzahl von Brennweiten) zunimmt. Man erkennt, daß das Bild entfernter Gegenstände dem Brennpunkte sehr nahe liegt; man kann also die Brennweite, folglich auch den Krümmungsradius (da $r = 2f$) sehr nahe richtig bestimmen, wenn man das Bild hinreichend entfernter Gegenstände, z. B. heller Fenster oder Lichtflammen auf einem Papierstreifen auffängt und die Ent-

fernung des letzteren vom Spiegel mißt, wann die Umrisse des Bildes am schärfsten erscheinen.

Die Hohlspiegel finden theils zu wissenschaftlichen, theils zu technischen Zwecken vielfache Anwendung. In ersterer Beziehung erwähnen wir die Spiegelteleskope, deren Beschreibung weiter unter gegeben wird. Bei dem Mikroskope, der Zauberlaterne und ähnlichen Projections-Apparaten (vergleiche weiter unter §. 17a) dient er zur Verstärkung der Beleuchtung. Aehnlich ist seine Wirkung bei Leuchtthürmen und den Signallaternen der Eisenbahnen, wie sie z. B. an den Locomotiven befestigt sind. In diesem Falle befindet sich die Lichtquelle im Brennpunkt, so daß die zurückgeworfenen Strahlen alle parallel zur Axe sind. Befindet sich das Auge in dieser Richtung, so scheint diesem die ganze Fläche des Spiegels zu leuchten, ähnlich wie man es zuweilen an den von der Abendsonne beschienenen Fensterscheiben bemerkt; daher ist die Flamme sehr weit sichtbar, namentlich wenn der Spiegel statt kugelförmig, parabolisch gekrümmt ist. In diesem Falle sind nämlich die von dem Brennpunkte ausgehenden Strahlen genau zur Axe parallel, wie groß man auch die Fläche des Spiegels macht, während dieses bei Kugelspiegeln nur annähernd und nur für solche Strahlen gilt, welche nahe der Axe auffallen. Solche parabolischen Spiegel sind auch als Brennspiegel sehr wirksam, doch bietet die Herstellung der Parabelform, wenn sie genau sein soll, große technische Schwierigkeiten dar, und daher hat man dieselben zu wissenschaftlichen Instrumenten z. B. Spiegelteleskopen bisher nur ausnahmsweise angewandt. Es sei erwähnt, daß der Physiker Foucault, nach einem von ihm selbst ersonnenen Verfahren durch den geschickten Mechaniker Eichens in Paris parabolische Glas-Silberspiegel von vorzüglicher Wirkung hat herstellen lassen; auch der Optiker Steinheil in München verfertigt dieselben.

Stellt man ein Lichtobject z. B. einen stark beleuchteten Blumenstrauß von lebhaften Farben so auf, daß die vom Spiegel abgewandte Seite desselben bedeckt ist, so läßt sich durch eine passende Neigung des Spiegels bewirken, daß nur das Bild des Gegenstandes in der Luft schwebend, von einem von dem Spiegel

hinreichend entfernten Beobachter gesehen wird und diesem in der Luft zu schweben scheint. Am passendsten bringt man dabei den Gegenstand zwischen Focus und Centrum, nahe dem letzteren an. Da das Bild verkehrt ist,. so lassen sich auf diese Weise frappante Erscheinungen hervorrufen, z. B. bergauffließendes Wasser. Im Mittelalter benutzte man dieselben zur Ausbeutung des Aberglaubens, indem man auf die beschriebene Art u. A. die Portraits verstorbener Personen, schwebende Schädel, Dolche, Jesuskindlein und dergleichen zeigte. Auch im Alterthum scheinen die Bilder des Hohlspiegels von den Priestern benutzt zu sein, um die Götter in Rauchwolken bei Opfern erscheinen zu lassen. Daß die Alten die Wirkungen des Hohlspiegels gekannt haben, ist sicher, wenngleich die darüber überlieferten Nachrichten zum Theil übertrieben sind, wie z. B. die, daß Cäsar die Lager und Städte der Britannier mittels eines Hohlspiegels von der französischen Küste aus beobachtet haben soll.

7. Erhabene Spiegel oder convexe Spiegel. — Die erhabenen Kugelspiegel, welche durch einen Theil einer von außen spiegelnden Kugel gebildet sind, erzeugen wie die ebenen Spiegel nur subjective, hinter der Spiegelfläche erscheinende Bilder, da die reflectirten Strahlen stets divergirend sind, sich also nur in ihrer Rückverlängerung schneiden. Sind die auffallenden Strahlen zur Axe parallel, so scheinen die nach allen Seiten reflectirten Strahlen von einem Punkte zu kommen, welcher um dem halben Kugelradius hinter der Oberfläche liegt; man erblickt in diesem Punkte z. B. bei Themometerkugeln, blanken Knöpfen 2c. kleine Bilder der Sonne oder entfernterer Lichtpunkte. Zur genaueren Erläuterung der hier stattfindenden Gesetze denken wir uns wiederum einen Kreisbogen mit 2^{cm} Radius geschlagen, welcher den Spiegel darstellt, und ziehen durch das Kugelcentrum (M) und die Mitte des Spiegels (S) die Axe MS, die beliebig weit verlängert werden kann. Der geometrische Brennpunkt, welcher SM halbirt, werde wieder durch F bezeichnet; wir nehmen in 6^{cm} Entfernung vor dem Spiegel eine Lichtlinie AB von 1^{cm} Höhe an, welche auf der Axe senkrecht steht. Vom höchsten Punkt B aus ziehen wir einen Strahl parallel zur Axe, welcher

den Spiegel in *C* trifft; der zugehörige reflectirte Strahl *CD* muß, verlängert, durch den Brennpunkt gehen, hat also die Richtung der Linie *FC*. Ziehen wir nun von *B* aus noch einen zweiten Strahl *BM*, der, weil er die Oberfläche der Kugel senkrecht trifft, in sich selbst zurückgeworfen wird, so schneidet sich die Richtung desselben mit der des ersten in einem Punkte *b*, welcher hinter dem Spiegel liegt und das geometrische Bild des Lichtpunktes ist. Das vollständige Bild von *BA* wird durch ein von *b* auf die Axe gefälltes Loth *ba* dargestellt. Das Bild ist also kleiner und aufrecht. Läßt man nun den Gegenstand dem Spiegel näher rücken etwa in Entfernungen von 4 und 2^{cm} und wiederholt die Construction, (wobei der bereits gezogene Parallelstrahl unverändert bleibt), so erkennt man leicht, daß das Bild größer wird und von der Rückseite des Spiegels her sich dem Gegenstande nähert, so daß schließlich beide in der Spiegelfläche sich zu berühren scheinen. Da auch beim convexen Spiegel die Richtungen der von einem Punkte aus auffallenden Strahlen nach ihrer Reflection nicht wieder genau durch einen Punkt gehen, so erscheinen die Bilder, namentlich naher Gegenstände, hier ebenfalls stark verzerrt.

Die erhabenen Kugelspiegel finden, außer zur Herstellung von Lichtpunkten kaum wissenschaftliche Anwendung, doch begegnet man ihnen im Leben vielfach. Wegen der Kleinheit der durch sie hervorgerufenen Bilder benutzt man sie wohl zu Taschenspiegeln. Bekannt sind auch die in den Gärten aufgestellten Spiegelkugeln, welche jedoch, da man in ihnen fast an allen Punkten des Gartens die in unerträglichem Glanze strahlenden Sonnenbildchen erblickt, für die Augen sehr schädlich sind.

Jede Sammellinse zeigt neben den umgekehrten Reflexbildern, welche bereits erwähnt wurden, auch kleine aufrechte Bilder, welche durch Spiegelung an der erhabenen Fläche hervorgerufen werden. Aehnliche Bilder bemerkt man auch im Auge, bei günstiger Beleuchtung sogar mehrfach. Helmholtz hat diese Bilder in sehr sinnreicher Weise benutzt, um die Formveränderung der Augenlinse bei der Accomodation nachzuweisen. Das Nähere hierüber wird im Abschnitt über das Auge erwähnt werden.

Außer den kugelförmig gekrümmten convexen Spiegeln hat man noch cylindrische und kegelförmige. Erstere wirken nach der Richtung der Axe hin — wie ebene, senkrecht dagegen wie Kugelspiegel, also verkleinernd. Die Gegenstände, deren Längsrichtung zur Axe parallel ist, erscheinen daher verschmälert, häufig, wie z. B. entfernte Fenster, als Lichtlinien. Man benutzt daher auch wohl stark gekrümmte Cylinderspiegel, z. B. Reagircilinder, zur Hervorbringung von Lichtlinien bei Versuchen mit dem Prisma. Umgekehrt erscheinen die Gegenstände sehr niedrig und deshalb in die Breite gezogen, wenn ihre Längsrichtung sich mit der des Spiegels kreuzt. Aehnliches läßt sich von den Kugelspiegeln sagen. Man wird sich hiernach leicht die Zerrbilder, welche sich auf blanken Leuchterstielen, Theemaschinen 2c. zeigen, erklären können.

8. Unregelmäßig zerstreutes oder diffuses Licht. Dämmerung. — Die meisten Körper werfen das Licht nicht wie die ebenen Spiegel nach bestimmten, sondern nach allen Richtungen zurück; indem die kleinen Erhabenheiten ihrer Oberfläche dabei ähnlich wie Kugelspiegel das Licht zerstreuen, werden sie von allen Seiten sichtbar. Selbst ebene Spiegel, welche bei vollkommener Genauigkeit nur die Bilder der Gegenstände zeigen sollten, zerstreuen einiges Licht, namentlich wenn ihre Oberfläche nicht ganz rein ist. Die unregelmäßige Reflection trägt wesentlich zur Milderung der Gegensätze von Licht und Schatten bei, da letztere ohne das diffuse Licht vollständig dunkel erscheinen würden. Ebenso würde auch jede starke, vor der Sonne vorüberziehende Wolke plötzlich Dunkelheit hervorrufen, wodurch Zimmer, die häufig genug, namentlich in der Stadt, nur durch diffuses Licht, theils von den Wolken und theils von irdischen Gegenständen herrührend, erleuchtet werden, unbewohnbar sein müßten.

Durch die unregelmäßige Reflection in der Luft und den in ihr schwebenden Wasserdämpfen und Wolken erklärt sich die Dämmerung. Die unregelmäßig zurückgeworfenen Strahlen können nämlich noch in unser Auge gelangen, wenn die Sonne selbst schon beträchtlich (bis 18° etwa) unter dem Horizonte steht.

In der tropischen Zone ist die Dämmerung bedeutend kürzer, weil die Sonnenbahn den Horizont dort fast senkrecht schneidet.

9. Brechung des Lichtes, Brechungsgesetz, totale Reflection. — Trifft ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche zweier Medien, so wird er theils zurückgeworfen, theils dringt er in das zweite Medium ein. Ist in dem letzteren die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eine andere, so wird er zugleich nach §. 12b der Wellenlehre von seiner Richtung abgelenkt und zwar, wie am angegebenen Orte erklärt ist, so, daß der Sinus des Winkels, welchen der auffallende Strahl mit dem Einfallslothe bildet, sich zu denjenigen des gebrochenen Strahles verhält, wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in dem ersten Medium zu der in dem zweiten. Bezeichnen wir also den Auffallswinkel durch φ, den Brechungswinkel durch ψ, so gilt die Gleichung:

$$\sin\varphi : \sin\psi = v : v' \qquad a.$$

wenn man durch v und v' die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten bezeichnet. Das (constante) Verhältniß der letzteren führt den Namen „Brechungsexponent“ und wird gewöhnlich durch n bezeichnet. Er hat bei Luft und Wasser den ungefähren Werth 4 : 3, bei Luft und Glas 3 : 2, doch ändert sich letzterer sobald die Elasticität oder Dichtigkeit eine Veränderung erleidet, was z. B. durch Temperaturwechsel geschehen kann. Im Allgemeinen wird, wie in den hier angezogenen Beispielen, das Licht beim Uebergange in ein dichteres Medium dem Einfallslothe zugebrochen, so daß also ψ kleiner als φ ist.

Um die Bedeutung des durch die Gleichung (a) ausgesprochenen Brechungsgesetzes in einem speciellen Falle zu veranschaulichen, betrachten wir den Uebergang der Lichtstrahlen aus Luft in Wasser. Die ebene Grenzfläche beider Medien werde durch die Grade MN dargestellt, ein auffallender Lichtstrahl durch AB bezeichnet. Man errichte sich im Punkte B das Einfallsloth und schlage mit B einen Kreis mit dem Radius BA welcher letzterer der Einfachheit wegen gleich der Maßeinheit angenommen werden mag. Dieser schneide das Loth außerhalb des Wassers

in L, innerhalb desselben in P. Man fälle ferner von A auf LP ein Loth AD und verlängere dasselbe bis zum Punkte E, wo es den Kreis durchschneidet, theile AD ($= sin\ \varphi$) in drei gleiche Theile, von denen man zwei auf DE von D aus aufträgt, von dem so erhaltenen Punkte F ziehe man eine Parallele zum Lothe LP, welche den Kreis in C durchschneidet, verbinde endlich B und C, so stellt BC den gebrochenen Strahl dar. Daß in der That nun die Gleichung:

$$sin\ \varphi : sin\ \psi = 3 : 2$$

erfüllt ist, erkennt man leicht, wenn man sich auch von C aus ein Loth CG auf LP fällt, dieses ist nämlich gleich $sin\ \psi$, aber auch $= DF$. Macht man nun die angegebene Construction der Reihe nach für mehrere Werthe von φ, etwa 10^0, 20^0, 40^0, 60^0, 80^0, so findet man, daß die zugehörigen Werthe von ψ nahezu sind, resp. $7\frac{1}{2}^0$, 15^0, 29^0, $40\frac{1}{2}^0$, $47\frac{1}{2}^0$, so daß die entsprechenden Ablenkungen sind $2\frac{1}{2}^0$, 5^0, 11^0, 19^0, $32\frac{1}{2}^0$. Man erkennt hieraus, daß die Ablenkung des Lichtstrahles von der geraden Linie um so mehr zunimmt, je größer φ wird.

Man kann dieses allmälige Zunehmen der Ablenkung sehr anschaulich an einem von J. Müller angegebenen einfachen Apparate, der zugleich zur Demonstration des Brechungsgesetzes dient, erkennen. Derselbe besteht aus einem ca. 30^{cm} langen halbkreisförmigen Gefäße von etwa 4^{cm} Tiefe. Im Mittelpunkt des Halbkreises, also in der Mitte der geraden Wand befindet sich ein verticaler Spalt, während die halbkreisförmige Wand auf ihrer innern Seite in Grade getheilt ist. Man füllt das Gefäß bis zur halben Höhe mit Wasser und läßt, indem man es horizontal aufstellt, in einem dunkeln Zimmer durch den Spalt mit Hülfe eines Heliostaten-Spiegels (pag. 293) Sonnenlicht eintreten, dessen Richtung sich durch eine auf dem Gradbogen erhellte Stelle markirt. Da man den Weg des Lichtes sowohl im Wasser als auch über demselben, in der Luft verfolgen kann, so überzeugt man sich durch directe Ablesung der Winkel φ und ψ zunächst, daß die Gleichung

$$sin\ \varphi : sin\ \psi = 4 : 3$$

nahezu erfüllt ist, indem die beobachteten Werthe von φ und ψ

mit den nach der oben angegebenen Construction gefundenen übereinstimmen. Stellt man ferner das Gefäß so, daß der auffallende Lichtstrahl senkrecht zu der mit dem Spalte versehenen Wand steht, also ungebrochen weiter geht, und dreht dann das Instrument so, daß der Winkel φ allmälig wächst, so sieht man, daß der Winkel ψ zwar auch wächst, der Unterschied beider aber allmälig zunimmt, derart, daß, während anfangs beide Strahlen zusammenfielen, der Werth von ψ nur bis etwa 48° gewachsen ist, während φ schon fast den Werth von 90° erreicht hat. Der größte Werth, welchen der Brechungswinkel ψ erreicht, wenn der Auffallswinkel φ bis 90° gewachsen ist, heißt „der Grenzwinkel“. Fällt von einem Lichtpunkte innerhalb des Wassers ein Strahl unter diesem Winkel auf die Wasserfläche, so streift also der zugehörige austretende Strahl dieselbe. Weicht ein Strahl innerhalb des Wassers von dem Lothe mehr als 48½° ab, ist also sein Winkel mit der Oberfläche kleiner als 41½°, so tritt er gar nicht aus, sondern wird in das Wasser wieder zurückgeworfen, wie man sagt: „total reflectirt“, da in diesem Falle kein Theil des Lichtes in die Luft übergeht. Die Wasserfläche wirkt dann als Spiegel und man sieht die so entstandenen Bilder von Gegenständen, welche nahe der Oberfläche sind, wie z. B. die Fische in einem Aquarium, wenn man das Auge in die Richtung der reflectirten Strahlen bringt, also von unten her gegen die Wasserfläche sieht.

Der Grenzwinkel ist (vom Lothe ab gerechnet) um so kleiner, je stärker das Licht gebrochen wird, je größer also das Brechungsverhältniß ist. Er beträgt beim Glase etwa 42°, so daß ein Strahl, der weniger als 48° gegen die Grenzfläche geneigt ist, nicht mehr austreten kann. Man findet den Grenzwinkel im Allgemeinen mit Hülfe der zur Erläuterung des Brechungsgesetzes angegebenen Construction, wenn man den auffallenden Lichtstrahl der Wasserfläche mehr und mehr sich nähern und schließlich mit ihr zusammenfallen läßt. Man hat dann statt der Linie AE den Durchmesser des um B beschriebenen Kreises, nach dem Verhältniß von 3 : 2 beim Glase, von 4 : 3 beim Wasser zu theilen.

Die Brechung des Lichts war schon den Alten (im zweiten

Jahrhundert vor Chr.) bekannt, doch wurde das Brechungsgesetz, welches also allgemein durch die Gleichung

$$\sin \varphi = n \sin \psi \qquad a'$$

ausgedrückt ist (worin n das Brechungsverhältniß oder nach der Vibrations-Hypothese, das Verhältniß $v : v'$ bezeichnet), erst im Mittelalter (1621) durch Snellius gefunden, nachdem schon etwas früher (1604) Keppler der Entdeckung desselben nahe gewesen war.

Man hat das Brechungsverhältniß für fast alle bekannten Körper, mit zum Theil sehr großer Genauigkeit, meistens mit Hülfe des später zu beschreibenden Prismas bestimmt; es finden sich tabellarische Zusammenstellungen der betreffenden Zahlenwerthe in jedem Lehrbuch der Physik. Die Kenntniß derselben ist nicht nur für den Physiker, sondern ebenso für den Chemiker von Wichtigkeit, da die geringste Veränderung in der materiellen Beschaffenheit der Körper von einer entsprechenden Aenderung der Werthe von n begleitet ist, und durch Beobachtung der letzteren ermittelt werden kann. Bekannt ist, daß wenn man Zucker in Wasser auflöst, sich die Verbreitung der Zuckerlösung an den „Schlieren" (Stellen veränderter Brechung), die man bemerkt, wenn man die Lösung gegen das Licht hält, erkennen läßt. Aehnliches zeigt sich bei Lösung von Salzen oder Säuren. Kennt man das Gesetz, nach welchem sich das Brechungsverhältniß mit der Concentration verändert, so kann man die letztere vermittelst des ersteren bestimmen. Aehnlich lassen sich manche Stoffe auf ihre Güte durch optische Untersuchung prüfen.

Wir erwähnen zunächst noch einige einfache auf der Lichtbrechung beruhende Erscheinungen. Am bekanntesten ist die scheinbare Hebung von Gegenständen unter Wasser. Taucht man einen geraden Stab (z. B. ein Ruder) in schräger Richtung in das Wasser, so erscheint der eingetauchte Theil nach oben zu gebrochen. Ebenso erblickt man Fische der Oberfläche des Wassers näher, als sie es in Wirklichkeit sind; selbst der Grund klarer Gewässer mit den darauf ruhenden Steinen und andern Gegenständen erscheint gehoben und die Tiefe deshalb geringer. Legt man eine Münze auf den Boden eines Gefäßes, tritt dann so weit zurück,

daß dieselbe dem Auge verschwindet und läßt nun bei unveränderter Stellung des Kopfes durch eine zweite Person Wasser in das Gefäß gießen, so erscheint die Münze wieder. Die von ihr an das Auge gelangten Lichtstrahlen müssen also eine gebrochene Linie beschrieben haben. Weitere Anwendungen des Brechungsgesetzes werden im Folgenden besprochen werden.

10. Atmosphärische Strahlenbrechung. Luftspiegelung. — Durch die in der Atmosphäre stattfindende Brechung erscheinen die Gestirne (auch Sonne und Mond) besonders wenn sie in der Nähe des Horizontes stehen, sowie entfernte irdische Gegenstände, namentlich die Horizontlinie („die Kimm") selbst etwas gehoben. Die in die Atmosphäre eintretenden Lichtstrahlen werden nämlich wegen der unter normalen Verhältnissen nach der Erdoberfläche hin allmälig zunehmenden Dichtigkeit der Luft, wie es beim Uebergange in dichtere Medien überhaupt der Fall ist, dem Lothe allmälig mehr und mehr zugebrochen und beschreiben deshalb statt einer geraden eine etwas abwärts geneigte krumme Linie. Die Lichtstrahlen treffen demnach auf unser Auge so, als kämen sie von einem höher gelegenen Punkte; wir sehen aber einen Gegenstand stets in der Richtung, welche die Lichtstrahlen bei ihrem Eintritt in unser Auge besitzen. Aehnlich erklärt sich die scheinbare Hebung des Horizontes. In Folge derselben ist z. B. am Seestrande bei Danzig die ca. $3\frac{1}{2}$ Meilen entfernte Halbinsel Hela, obgleich dieselbe eigentlich unter der über den Horizont gezogenen Gesichtslinie liegt, meistens sichtbar. Von Hastings aus soll man zuweilen sogar die 10 Meilen entfernte französische Küste sehen. Bei abnormen Dichtigkeitsverhältnissen zeigen sich die Bilder sehr entfernter Gegenstände, meistens allerdings verschwommen, hoch in der Luft; so erblickt man von den Sicilien gegenüberliegenden Küsten Calabriens zuweilen Säulen, Schlösser, Haine, weidende Heerden zc. Die Erscheinung ist unter dem Namen „Fata morgana" bekannt.

Ueber heißen Sandwüsten, namentlich also in der tropischen Zone, werden die Gegenstände häufig in den unmittelbar über der Erdoberfläche lagernden, erhitzten Luftschichten in ähnlicher Weise abgespiegelt, wie wir es bei Wasserflächen beobachteten.

Wegen der nach dem Erdboden hin abnehmenden Dichtigkeit der Luft muß nämlich ein von oben her in dieselbe eindringender Lichtstrahl so abgelenkt werden, daß seine Richtung sich mehr und mehr der Horizontalen nähert. (Man zeichne sich, um dieses einzusehen, den Weg des Lichtstrahls in zwei aufeinanderfolgenden Luftschichten von je 1^{cm} Höhe auf, und bestimme den Weg eines etwa unter 45^0 mit dem Lothe in die obere eindringenden Lichtstrahls unter der Annahme, daß die tiefere eine geringere Dichtigkeit besitzt.) Da demnach der von ihm mit den aufeinanderfolgenden, horizontal gelagerten, Luftschichten gebildete Winkel kleiner und kleiner wird, so muß endlich eine totale Reflection, folglich auch eine Spiegelung eintreten. Hierauf beruht „das Wüstengesicht" der Araber, das bekanntlich der französischen Armee in Aegypten manche Täuschung bereitete. Der die Expedition begleitende Physiker Monge fand sogleich die Erklärung der auffallenden, damals noch nicht wissenschaftlich untersuchten Erscheinung.

Ueber der kalten Wasserfläche in nördlichen Meeren bemerkt man zuweilen in der Luft schwebende Spiegelbilder ferner Gegenstände, wie Schiffe, Küsten rc. wenn man die letzteren selbst noch nicht sehen kann; hier liegen die Verhältnisse umgekehrt. Die dichtesten Luftschichten lagern über dem Wasser und werden stets auf einer tieferen Temperatur erhalten, selbst wenn die oberen bereits durch die Sonne erwärmt sind. Ein aufwärtsgehender Lichtstrahl wird daher mehr und mehr der horizontalen Richtung zu abgelenkt und endlich reflectirt werden. Die entstehenden Bilder sind zuweilen auffallend klar; so sah Scoresby im Jahre 1822 das Spiegelbild eines unter dem Horizonte befindlichen Schiffes so deutlich, das er letzteres als dasjenige seines Vaters erkannte.

11. Brechung des Lichts in ebenen Glasscheiben und im Prisma. — Betrachtet man einen geradlinig begrenzten Gegenstand, z. B. den Rahmen eines Fensters durch eine etwas dicke Spiegelglasscheibe, so bemerkt man, wenn man zugleich über den Rand der Scheibe hinweg nach demselben Gegenstand sieht, daß er etwas seitlich verschoben erscheint und zwar

um so mehr, je größer der Winkel ist, den die Fläche des Glases mit der Visirlinie (Verbindungslinie des Auges mit dem betrachteten Punkte) bildet. Die Erscheinung erklärt sich leicht aus der zweimaligen Brechung der Lichtstrahlen an den beiden Begrenzungsflächen des Glases, welche sowohl beim Eintritt als auch Austritt derselben stattfindet und bewirkt, daß der austretende Strahl zum ursprünglichen zwar parallel ist, aber etwas seitwärts hervortritt.

Ist ein Glas keilförmig geschliffen, also durch zwei gegeneinander geneigte Ebenen begrenzt, so bildet der durch zweimalige Brechung abgelenkte austretende Lichtstrahl mit dem auffallenden einen Winkel, der um so größer ist, je größer der Neigungswinkel der beiden Seitenflächen ist. Einen solchen Glaskeil nennt man ein Prisma. (Man zeichne sich zur Veranschaulichung des Vorganges einen Winkel von 60° als Durchschnitt des Prismas, lasse einen Lichtstrahl unter ca. 45° zur Seitenfläche geneigt auffallen und verfolge den Weg desselben mit Hülfe der pag. 310 gegebenen Construction.) Hält man ein Prisma so, daß die Durchschnittslinie der Seitenfläche, „die brechende Kante", nach unten liegt, und läßt ein Bündel Sonnenstrahlen nahezu senkrecht auf eine Seitenfläche fallen, so wird dasselbe durch das Prisma nach oben hin abgelenkt und zeigt sich farbig, wenn es vorher weiß war. Diesen letzten Theil der Erscheinung werden wir weiter unten besprechen. Einem in der Richtung der austretenden Strahlen befindlichen Auge würde also der Lichtpunkt, von dem sie ausgegangen sind, tiefer, nach der Seite der brechenden Kante hin verschoben, zu liegen scheinen. Die Größe dieser Verschiebung hängt, abgesehen von dem Winkel des Prismas, noch von dem Brechungsverhältniß des Glases ab. Dreht man, während ein Bündel Sonnenstrahlen in der oben angegebenen Weise durch das Prisma hindurchgeht, letzteres allmälig, so zeigt sich, daß der austretende Strahl der Bewegung des Prismas bis zu einem gewissen Punkte folgt, und, wenn er am wenigsten von dem nicht abgelenkten Strahle entfernt ist, einen Augenblick stille zu stehen scheint, und wieder umkehrt, auch wenn man die Drehung des Prisma in demselben Sinne

fortsetzt. In der angedeuteten Stellung, in welcher also das Prisma die kleinste Ablenkung (das Minimum der Ablenkung) hervorbringt, findet ein symmetrischer Durchgang der Lichtstrahlen statt, so daß sie mit beiden Seitenflächen gleiche Winkel bilden. Bezeichnet man den Winkel des Prismas mit c, den kleinsten Ablenkungswinkel mit d, das Brechungsverhältniß durch n so gilt die Gleichung:

$$n = \frac{\sin {}^1/_2\,(d + c)}{\sin {}^1/_2\, c}.$$

Nach derselben kann man n berechnen, wenn die Werthe von d und c durch Beobachtung ermittelt sind, was mit großer Genauigkeit geschehen kann.

Fällt ein Lichtstrahl unter einen Winkel welcher kleiner ist als 48^0 auf die zweite Fläche des Prismas, so kann er gar nicht austreten, sondern wird nach pag. 312 total reflectirt. Dieses findet bei den Spiegelprismen Anwendung, deren Durchschnitt gewöhnlich ein rechtwinkliges, gleichschenkliges Dreieck bildet. Legt man ein solches Prisma auf den Tisch mit seiner breitesten Fläche (Hypotenusenfläche) nach unten, und sieht schräge darauf, so spiegeln sich in der letzteren die gegenüberliegenden Gegenstände sehr hell ab, die Fläche selbst erscheint dabei silberglänzend. Man benutzt diese Erscheinung bei den zur Zierde der Kronleuchter dienenden Prismengläsern, welche häufig die Form der Spiegelprismen haben, indem man dieselben so aufhängt, daß bei günstiger Beleuchtung die breite Fläche stark glänzt, während zugleich durch die Lichtbrechung an den unter spitzen Winkeln zusammenstoßenden Flächen ein Farbenspiel erzeugt wird (vergl. weiter unten §. 13). Aehnlich erklärt sich der Glanz geschliffener Diamanten. Wegen der großen Helligkeit der von ihnen erzeugten Bilder wendet man die Spiegelprismen bei optischen Instrumenten häufig anstatt der Spiegel an und zwar einmal zur Umkehrung von Bildern, sodann um einen Lichtstrahl rechtwinklig umzulenken. Dadurch kann man bei manchen astronomischen Fernröhren (z. B. den Passage-Instrumenten) oder den Mikroskopen dem Auge eine bequemere Stellung geben, so daß man seitlich hineinsieht, oder umgekehrt die Richtung von seitlich

auffallendem Licht so verändern, daß es zur Axe des Instrumentes parallel wird. Dieses kommt unter Anderem bei den später zu beschreibenden Spectroskopen zur Anwendung. Bei der camera lucida Wollaston's findet eine zweimalige totale Reflection statt. Das Instrument besteht dem Hauptheile nach aus einem kleinen Glasprisma, dessen Querschnitt den vierten Theil eines regelmäßigen Achteckes darstellt. Zwei seiner Seitenflächen (die größeren) bilden demnach einen rechten Winkel, während die anderen beiden zu ihnen unter Winkeln von je $67^{1}/_{2}{}^{0}$ geneigt sind und selbst mit einander einen Winkel von 135^{0} bilden. Lichtstrahlen welche auf eine der erstgenannten Flächen rechtwinklig fallen, werden zweimal total reflectirt, da sie die anderen Seitenflächen unter Winkel von $22^{1}/_{2}{}^{0}$ treffen, und treten senkrecht zu ihrer ursprünglichen Richtung wieder aus. Versieht man die camera lucida mit einem passenden Stativ, so kann man sie zum Zeichnen nach der Natur benutzen, indem, wenn man bei einer der scharfen Ecken vorbeisieht, man neben den Spiegelbildern der Gegenstände auch die Spitze des Zeichenstiftes sieht, mit dem man also den Conturen der ersteren folgen kann.

Um sich eine Anschauung von dem eigenthümlichen Glanze, der durch die totale Reflection hervorgerufen wird, zu verschaffen, tauche man einen leeren Reagircylinder in ein Glas mit Wasser und blicke schräg darauf, indem man das Ganze gegen das Tageslicht hält; seine Oberfläche erscheint dann sehr glänzend, als ob sie versilbert wäre. Einen ähnlichen Glanz sieht man häufig an der Oberfläche von Luftblasen, die sich an den Wänden eines mit Wasser gefüllten Glases angesetzt haben oder in einem Aquarium auch wohl von Insecten, z. B. Wasserspinnen, in das Wasser gebracht sind.

12. Undurchsichtigkeit. — Weil eine total reflectirende Fläche als vollkommener Spiegel wirkt, muß sie nach dem bei Erläuterung des Brechungsgesetzes über das Entstehen der totalen Reflection Gesagten, undurchsichtig erscheinen. Indessen wird auch bei nicht totaler Reflection doch wenigstens ein Theil des Lichtes bei jedem Uebergange in ein anderes Medium zurückgeworfen und daher muß, wenn der Vorgang sich häufig im Innern eines

Körpers oder eines Conglomerates kleiner Körper, z. B. Sand, wiederholt, eine starke Schwächung des Lichtes hervorgebracht werden, die sich bis zur Undurchsichtigkeit steigern kann. Dieses ist der Grund, weshalb an und für sich durchsichtige Körper, wie z. B. Eis, Glas und dergl. undurchsichtig werden und in der Farbe des von ihnen reflectirten Lichtes erscheinen, wenn man sie in kleine Partikelchen zertheilt, etwa zerstößt. Deshalb ist der Schnee undurchsichtig. Gießt man auf Glaspulver Terpentinöl oder eine andere Flüssigkeit von nahe demselben Brechungsvermögen, so wird es durchsichtig, da nun der Grund der totalen Reflection fortfällt. So kann man auch das Innere von Körpern, die wegen ihrer rauhen Oberfläche undurchsichtig erscheinen, wie z. B. ungeschliffene Edelsteine, untersuchen, wenn man sie in passende Flüssigkeiten legt.

13. Zerlegung des weißen Lichtes oder Farben-Zerstreuung (Dispersion). — Es wurde bereits erwähnt, daß weißes Licht bei seinem Durchgange durch ein Prisma nicht nur von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird, sondern auch farbig aus demselben hervortritt. Man zeigt dieses durch den Versuch am besten in der Weise, daß man Sonnenlicht durch eine enge, zur brechenden Kante des Prisma parallele Spalte auf letzteres fallen läßt; man bemerkt dann, daß das austretende Lichtbündel fächerförmig ausgebreitet ist und erblickt, indem man dasselbe vermittelst eines Papierschirmes auffängt, auf letzterem ein Farbenbild, das Spectrum genannt, welches in der Richtung der brechenden Kante dieselbe Länge hat wie diese, nach der darauf senkrechten Richtung aber folgende Reihe von Farben zeigt: roth, orange, gelb, grün, blau, violett. Läßt man eine dieser Strahlengattungen, nachdem man sie durch einen zweiten Spalt abgesondert hat, nochmals durch ein Prisma gehen, so zeigt sich nur eine neue Ablenkung, keine weitere Zerlegung; doch bemerkt man, daß das violette Licht im zweiten Prisma stärker gebrochen wird als das rothe. Fängt man nun das Bündel von Farbenstrahlen wie es aus dem ersten Prisma hervortritt, vermittelst eines Hohlspiegels, oder besser, mit Hülfe einer (weiter unten beschriebenen) achromatischen Linse auf, so

kann man sämmtliche Farben auf einen Punkt hin lenken und in diesem erscheint wiederum weißes Licht.

Auf Grund der angeführten und ähnlicher Versuche stellte Newton folgende Sätze auf: Das weiße Licht ist nicht einfach sondern aus vielen Farben zusammengesetzt, welche sich durch ihre Brechbarkeit unterscheiden, und zwar so, daß das rothe Licht am wenigsten, das violette am stärksten gebrochen wird und die dazwischenliegenden Farben nach der eben angegebenen Reihe in steigendem Maße. Sie trennen sich deshalb beim Durchgange durch das Prisma und rufen, wenn sie vereinigt das Auge treffen, wiederum den Eindruck des weißen Lichtes hervor.

Diese Erklärung Newton's, welche eigentlich nur ein treuer Ausdruck der beobachteten Thatsachen ist, wird durch zahlreiche Erscheinungen, welche zum Theil noch im Folgenden erwähnt werden, durchaus bestätigt und ist gegenwärtig von allen Physikern angenommen, wenngleich sie von Goethe (in seiner Farbenlehre) und seinem Anhänger, dem Philosophen Schopenhauer heftig bekämpft wurde. Nach der Vibrations-Hypothese entspricht die Zerlegung des weißen Lichtes in die einfachen Farben derjenigen eines Klanges in seine Theiltöne; hier wie dort wird eine zusammengesetzte Wellenbewegung in einfachere Wellenzüge aufgelöst. Diese Analogie, welche, wie wir sehen werden, sich auf viele andere Erscheinungen erstreckt, spricht nicht am wenigsten für die Richtigkeit der Vibrations-Hypothese.

Neben den sichtbaren enthält das weiße Sonnenlicht noch viele unsichtbare Strahlen. Fängt man das Spectrum mit einem Schirm, welcher photographisch präparirt ist, auf, so zeigt sich, daß das Papier im Violett, noch stärker jedoch jenseits desselben geschwärzt wird; da diese Schwärzung auf einer Zerlegung der Silbersalze beruht, mit denen das Papier imprägnirt ist, so kann man schließen, daß die jenseits der violetten hindurchgegangenen Strahlen, welche also noch brechbarer als diese sind, chemische Wirkungen auszuüben vermögen. Man kann durch dieselben nicht nur Zerlegungen, sondern auch chemische Verbindungen hervorrufen, z. B. die Bildung der Salzsäure aus einem

Gemisch von Chlor- und Wasserstoffgas, namentlich wenn man letzteres auf electrischem Wege (durch Zerlegung fertiger Salzsäure) gewonnen hat. Diese chemischen Strahlen sind es besonders, welche das Wachsthum der Pflanzen bewirken. Durch Uebertragung der lebendigen Kraft der Aethervibrationen wird nicht nur die oben angedeutete innere, sondern auch äußere Arbeit geleistet, welche im Laufe der Jahre sehr bedeutend werden kann, wie man sofort erkennt, wenn man bedenkt, daß beim Wachsen z. B. eines Baumes eine nicht geringe Last bis auf eine beträchtliche Höhe gehoben wird. Die chemischen Strahlen sind außer im Sonnenlichte namentlich im electrischen und in demjenigen des brennenden Magnesiums enthalten. Auch jenseits der rothen gehen noch weniger brechbare dunkle Strahlen durch das Prisma hindurch, welche man als Wärmestrahlen erkannt hat. Die Wirkung derselben läßt sich entweder mit einem Thermoscop oder mit Hülfe eines geschwärzten und mit Alkohol getränkten Papiers sichtbar machen, indem wegen der durch sie hervorgerufenen Verdunstung des Alkohols die von ihnen getroffenen Stellen schneller trocknen. Das Nähere darüber findet sich in der Lehre von der strahlenden Wärme §. 1 und 3.

Das sichtbare Spectrum bildet hiernach nur einen Theil und zwar den kleineren des ganzen Sonnenspectrums. Da nach der in der Einleitung gemachten Bemerkung die verschiedenen Farben sich nach der Vibrationstheorie durch die verschiedene Anzahl (n) der in der Secunde ausgeführten Schwingungen resp. durch die Wellenlänge unterscheiden, so erscheint die Thatsache, daß wir nicht alle Strahlengattungen durch unser Auge wahrnehmen, der in der Akustik erwähnten, nach welcher wir sehr schnelle und sehr langsame periodische Luftschwingungen auch nicht mehr als Töne empfinden, durchaus analog.

Da das Brechungsverhältniß nach der Vibrationshypothese zugleich das der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten ($v : v'$) angibt, so würde aus dem Obigen folgen, daß die violetten Strahlen sich im Glase langsamer fortpflanzen als die rothen. Im Weltraume, d. h. im Aether bewegen sich die verschiedenen Farben mit gleicher Geschwindigkeit, da man sonst bei Verfinsterungen

z. B. die Jupitermonde (vergl. weiter unten) vor dem Verschwinden in den einzelnen Farben nach ihrer Aufeinanderfolge im Spectrum sehen müßte, was nicht der Fall ist.

14. Kirchhoff'sche Linien und Spectralanalyse. Fraunhofer'sche Linien. — Fängt man das durch ein Prisma zerlegte Licht statt auf einen Schirm direct mit dem Auge auf, so erblickt man ebenfalls ein Spectrum, jedoch erscheinen in diesem die Farben naturgemäß in umgekehrter Reihenfolge. Am passensten wendet man zu diesem Versuche eine Lichtlinie an, die man entweder mit Hülfe eines cylindrischen Spiegels (pag. 309) oder besser durch einen beleuchteten feinen Spalt herstellt, dessen Längsrichtung zur brechenden Kante des Prisma parallel ist. Um störendes Licht möglichst abzuhalten, bringt man den Spalt am Ende einer Röhre etwa von der Länge der Sehweite (25^{cm}) an, an deren anderm Ende sich das Prisma befindet, welches ebenfalls von einem Schirme umgeben ist, damit in das hinter demselben befindliche Auge des Beobachters keine fremden Strahlen gelangen, welche nicht durch den Spalt und des Prisma gegangen sind. Durch die eben beschriebene Anordnung, welche den Spectral-Apparat in seiner einfachsten Form darstellt, erhält man unter Anwendung von weißem Licht die Farben des Spectrums sehr rein und glänzend. Läßt man statt weißen Lichts nur eine Strahlengattung auf den Spalt fallen, so erblickt man statt des Spectrum nur eine einfache Lichtlinie, welche als ein Bild des Spaltes anzusehen ist. Sie erscheint wegen der Brechung im Prisma nach der Seite der brechenden Kante hin um so mehr verschoben, je brechbarer die Strahlen sind, durch welche sie hervorgerufen wird. Man kann sich einfaches farbiges Licht verschaffen, indem man entweder weißes Licht zuerst durch ein zweites Prisma zerlegt und aus dem entstandenen Spectrum Strahlen der gewünschten Farbe auf den Spalt des Apparates fallen läßt, oder aber einfacher, indem man in eine an und für sich wenig oder gar nicht leuchtende Flamme von hinreichend hoher Temperatur gewisse Stoffe bringt, welche, indem sie darin verflüchtigt werden, das Licht derselben färben. Am geeignetsten ist zu diesem Versuche die Knallgasflamme (pag. 23) so wie die

Flamme eines Bunsen'schen Brenners (Leuchtgas mit Luft vermischt) jedoch genügt allenfalls eine Spiritusflamme. Bringt man in eine solche etwas Kochsalz (Chlornatrium) oder reines Natrium, so zeigt sich eine helle gelbe Linie. Ebenso kann man indem man die Chlorverbindungen anderer alkalischer Metalle oder diese selbst in die Flamme einführt noch andere verschiedenfarbige Bilder des Spaltes also verschiedene helle Linien hervorrufen, doch sendet meistens die durch sie gefärbte Flamme noch nicht einfaches sondern zusammengesetztes Licht aus; man erhält daher in solchen Fällen eine Reihe von hellen Linien, z. B. bei Anwendung von Chorlythium neben einer dunkelrothen namentlich noch eine gelbe. Zuweilen liegen mehrere Bilder so nahe bei einander, daß sie sich zu breiteren Streifen oder Banden — Theilen des Spectrums — vereinigen. Diese aus hellen Linien und Streifen zusammengesetzten unterbrochenen Spectra sind so charakteristisch, daß man aus ihnen die Natur der in die Flamme gebrachten Stoffe erkennen kann und zwar häufig, wie bei dem Natrium und Lithium aus dem bloßen Anblicke. Man kann daher den Spectralapparat zur chemischen Untersuchung einfacher und zusammengesetzter Stoffe z. B. von Mineralien anwenden, indem man sie direct oder passend vorbereitet (z. B. in Salzsäure aufgelöst) vermittelst eines umgebogenen Platindrathes entweder in die Flamme oder auf die Electroden eines kräftigen Inductions-Apparates oder einer Influenzmaschine bringt und das von ihnen hervorgerufene Spectrum untersucht. Dies ist die „Spectral-Analyse" welche im Jahre 1859 von Kirchhoff und Bunsen in Heidelberg entdeckt wurde, nachdem verschiedene Physiker (Foucault, Stokes, Balfour-Stewart, Angström) durch ihre Untersuchungen die Entdeckung derselben vorbereitet hatten.

Die Spectralanalyse unterscheidet sich abgesehen von außerordentlicher Einfachheit und Leichtigkeit ihrer Anwendung, durch ihre Feinheit von den sonst bekannten Methoden der chemischen Untersuchung, indem man fast unbegrenzt kleine Stoffmengen (bei Natrium wenige Milliontel eines Milligramms) durch sie aufzufinden vermag, welche sich durch die Wage nicht mehr nachweisen lassen; sodann genügt es zu ihrer Anwendbarkeit

das Licht des zu prüfenden Körpers zu sehen; sie läßt sich deshalb zur Analyse sehr entfernter brennender Körper z. B. Leuchtkugeln, Kometen, Gestirne anwenden, wie weiter unten im Folgenden noch näher auseinander gesetzt werden wird.

Um den Ort der einzelnen Linien des Spectrum fixiren zu können, läßt man eine beleuchtete Scala (gewöhnlich eine negative Photographie eines in Millimeter getheilten Maßstabes) an der zweiten Fläche des Prisma sich abspiegeln, so daß man ihr Bild und das zu untersuchende Spectrum zugleich sieht und sich merken kann bei welchem Theilstriche die einzelnen hellen Linien liegen. Noch sicherer ist es, das unbekannte Spectrum mit einem oder mehreren bekannten zu vergleichen, um sich von der Identität beider zu überzeugen. Zu diesem Zwecke leitet man das Licht einer zweiten Flamme in welcher bekannte Stoffe glühen, durch ein kleines, vor der obern Hälfte des Spaltes befindliches Reflections-Prisma in die hinter dem Spalte befindliche Röhre und zum Prisma, so daß man die beiden Spectra unmittelbar über einander sieht und sich überzeugen kann, ob einzelne der hellen Linien beider zusammenfallen. Läßt man directes oder reflectirtes Sonnenlicht auf den Spalt des Spectral-Apparates fallen, so erblickt man in dem glänzenden Spectrum eine große Anzahl verschieden starker dunkler Linien, welche alle parallel zur Längsrichtung des Spaltes und unregelmäßig vertheilt, theilweise zu mehr oder weniger dichten Gruppen vereinigt sind; sie heißen nach ihrem Entdecker „die Fraunhofer'schen Linien“. Ihre Zahl hängt von der Güte des angewandten Apparates ab; schon Fraunhofer bemerkte über 500 derselben. Der Grund dieser lange räthselhaften Erscheinung wurde ebenfalls — und dieses ist einer der wichtigsten Theile seiner Entdeckung — von Kirchhoff aufgefunden. Er ließ sogenanntes Drummond'sches Kalklicht (es wird hervorgerufen, indem man Kalk oder Kreide durch eine Knallgasflamme zum Weißglühen bringt), auf den Spalt fallen, und fand, wie er erwartete, ein vollständiges continuirliches Spectrum ohne dunkle Linien, wie es stets von weißglühenden festen oder flüssigen Körpern geliefert wird (vergleiche strahlende Wärme §. 4). Brachte er nun vor den Spalt eine

Natrium- oder Kochsalzflamme, welche allein, wie erwähnt, eine helle gelbe Linie erzeugt, und ließ durch dieselbe hindurch das Kalklicht auf den Spalt fallen, so entstand an der Stelle der hellen Linie eine dunkle in dem sonst continuirlichen Spectrum des Kalklichts. Im Sonnenspectrum liegt eine dunkle Linie, welche Fraunhofer mit *D* bezeichnete, an derselben Stelle wie die helle Natriumline. Sie tritt um so stärker hervor, wenn man das Sonnenlicht ebenfalls vor seinem Eintritte in den Spalt durch die Natriumflamme gehen läßt, während, wenn man das Sonnenlicht stark dämpft, die helle Linie sichtbar bleibt. Kirchhoff schloß hieraus: daß die in Rede stehende Linie nur im Contraste gegen die hellere Umgebung dunkel erscheine; er zeigte, daß die Lichtintensität an der betreffenden Stelle des Spectrum deswegen geringer sei, weil die Natriumflamme diejenigen Strahlen, die sie selbst aussendet, also die gelben, auch am stärksten absorbirt. Dieser Satz, den wir in dem Kapitel über die strahlende Wärme noch näher erläutern werden, gilt, wie Kirchhoff von sehr einleuchtenden Principien ausgehend, strenge nachwies, allgemein. Die Erscheinung ist der des Mittönens ganz analog; indem im vorliegenden Falle die mit einer gewissen Schnelligkeit vibrirenden gelben Strahlen des Kalklichtes ihre lebendige Kraft auf die Atome des glühenden Natriums übertragen, welche mit derselben Periode zu schwingen vermögen, gewissermaßen gleichgestimmt sind, werden sie selbst ausgelöscht. Kirchhoff schloß nun weiter, daß die sämmtlichen dunklen Linien auf ähnliche Weise, wie er sie künstlich hervorgerufen hatte, in der Sonne entständen, indem er annahm, daß letztere aus einem weißglühenden, festen oder flüssigen Kern bestehe, der für sich allein wie der glühende Kalk ein ununterbrochenes Spectrum liefern würde; daß der Kern aber von einer Flammenatmosphäre umgeben sei, die die glühenden Dämpfe verschiedener Stoffe, unter andern auch des Natriums, enthalte und, für sich betrachtet, an Stelle der dunklen, helle Linien zeigen würde. Zugleich sprach er die Vermuthung aus, daß die bei totalen Sonnenfinsternissen stets

sichtbaren Protuberanzen — in rosenrothem Lichte leuchtende Gebilde, welche über den Mondrand hervorragen, — nichts anderes seien, als Theile dieser leuchtenden Atmosphäre. Diese Vermuthung Kirchhoff's wurde einige Jahre später auf das Glänzendste gerechtfertigt, indem man bei Gelegenheit der totalen Sonnenfinsterniß am 18. August 1868 in dem Spectrum der Protuberanzen in der That helle Linien und zwar vorwiegend die des Wasserstoffs erblickte. Damit war auch die ältere, noch von Arago in diesem Jahrhundert vertheidigte Hypothese Herschel's, nach welcher die Sonne einen dunklen kalten Kern besitzen sollte, widerlegt. Diese stützte sich auf das eigenthümliche Aussehen der Sonnenflecken, welche in der Mitte einen dunklen Kern haben, der von einem Halbschatten umgeben ist. Man vermuthete, daß sie durch trichterförmige Oeffnungen in der Sonnenatmosphäre erzeugt würden, durch welche hindurch der dunkle Sonnenkörper sichtbar werden würde. Kirchhoff erklärte, damit schon eine von Gallilei ausgesprochene Vermuthung reproducirend, daß die Sonnenflecken, welche sich bekanntlich mit der Sonne in 25½ Tag herumdrehen, Wolken, also Verdichtungen der in der Sonnenatmosphäre vorhandenen glühenden Dämpfe, erzeugt durch örtliche Abkühlungen, seien. Auch von den Sonnenfackeln — besonders hellen Stellen der Sonnenscheibe — nahm er an, daß sie durch Temperatur-Schwankungen erzeugt würden, die, weil sie wegen ihrer ungemeinen Größe sich mit den auf der Erde stattfindenden kaum vergleichen lassen, auch außerordentlich viel stärkere atmosphärische Strömungen erzeugen müssen. Spörer glaubt, solche Sonnenstürme aus gewissen Abweichungen in der Bewegung der Flecke von der mittleren Geschwindigkeit erkannt zu haben.

Nach der Kirchhoff'schen Hypothese, deren Richtigkeit, weil sie in vielfacher Beziehung durch spectroskopische Untersuchungen bestätigt ist, kaum noch in Zweifel gezogen werden kann, müssen sich vermittelst der Fraunhofer'schen dunkeln Linien die Bestandtheile der Sonne ermitteln lassen, wenn es nur gelingt, irdische Stoffe aufzufinden, deren helle Linien in demselben Spectroskope genau mit gewissen dunkeln Linien des Sonnenspectrum zusam-

menfallen, wie es bei der Fraunhofer'schen Linie *D* und der hellen Natriumlinie der Fall ist. Dieses Zusammenfallen hat man nun in der That für eine ziemlich beträchtliche Anzahl von Stoffen beobachtet; so fallen z. B. etwa 80 helle Eisenlinien mit dunkeln Fraunhofer'schen Linien zusammen. Je mehr helle Linien eines Stoffes mit dunklen des Sonnenspectrums zusammenfallen, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß dieses Zusammenfallen kein zufälliges, der betreffende Stoff vielmehr wirklich in der Sonnenatmosphäre vorhanden ist. Mit Sicherheit hat man auf diese Weise außer den bereits erwähnten Stoffen das Vorhandensein von Calcium, Magnesium, Chrom; mit Wahrscheinlichkeit auch das des Nickels, Kupfers, Zinks und Bariums nachgewiesen.

Um eine Grundlage für die Vergleichung der hellen und dunklen Linien zu gewinnen, zeichnete Kirchhoff auf das sorgfältigste das Sonnenspectrum, dessen Untersuchung nun eine ähnliche Wichtigkeit gewonnen hat, wie die des Fixsternhimmels, mit allen dunkeln Linien, wie er es in seinem mit fünf Prismen versehenen Spectroskop erblickt hatte. Seine Zeichnungen sind später, namentlich durch Angström, noch ergänzt. J. Müller und Rutherfort gelang es, vortreffliche Photographien des Sonnenspectrums zu erhalten, während andere Forscher z. B. Miller die aus hellen Linien bestehenden Spectra der verschiedenen irdischen Elemente mit möglichster Vollständigkeit und Genauigkeit entwarfen und zwar sowohl fester Körper als auch der Gase, welche letztere man in eine Glasröhre einschloß und zur Erzeugung des Spectrum durch einen electrischen Strom glühend machte. Derartige Untersuchungen sind namentlich von Plücker, Hittorf, Lockyer, Wüllner, Secchi u. A. ausgeführt. Dabei hat sich u. A. gezeigt, daß in einer glühenden Gasmasse schon dadurch dunkle Linien entstehen können, daß die äußern Theile derselben das von dem Innern ausgehende Licht absorbiren. Dies ist für die Theorie der physischen Constitution der Sonne von großer Wichtigkeit. Aus der Form der Protuberanzen glaubt Tachini, gestützt auf außerordentlich zahlreiche Beobachtungen schließen zu müssen, daß die Sonne noch eine vollkommen gasige Masse ist, relativ

heiß im Innern und kühler in den äußern Theilen, welche letztere man bisher als getrennte Schichten auffaßte und als „Photosphäre“ und „Chromosphäre“ unterschied.

Da diese Ansicht mit der des ausgezeichneten englischen Spectroskopikers Lockyer und Anderer im wesentlichen übereinstimmt, so würde, wenn sie richtig ist, hiernach die Kirchhoff'sche Hypothese über die physische Beschaffenheit der centralen Theile des Sonnenkörpers etwas modificirt werden. Durch die Beobachtungen Jansen's, welche derselbe seit längerer Zeit in der außerordentlich reinen Atmosphäre auf den Höhen des Himalaya-Gebirges bei Simla anstellt, und der namentlich bei Gelegenheit der totalen Sonnenfinsterniß am 12. December 1871 das Spectrum der nur bei solchen Gelegenheiten sichtbaren Corona mit großer Sorgfalt untersucht hat, ist festgestellt, daß auch diese auf das innigste mit den vorhergenannten untern Schichten des Sonnenballs zusammenhängt, indem in ihr ebenfalls die hellen Linien des Wasserstoffs sowie einige dunklen Linien, namentlich die mehrfach erwähnte Linie *D*, vorkommen. Wahrscheinlich wird also die Corona, die, weil sie die hellen Linien des Wasserstoffs zeigt, denselben sicher in glühendem Zustande enthält, von der Substanz der Protuberanzen gespeist.

Selbstverständlich lassen sich derartige Beobachtungen wie die erwähnten nicht mit einem so einfachen Spectroskope anstellen, wie wir es oben beschrieben haben, abgesehen von andern Gründen schon deshalb nicht, weil in einem solchen das Spectrum viel zu schmal ist, und sich in Folge dessen zu wenige Details in demselben unterscheiden lassen. Durch eine größere Anzahl von Prismen läßt sich zunächst das Spectrum weiter auseinanderziehen; außerdem erblickt man die Linien viel schärfer und zahlreicher als mit bloßem Auge, mit Hülfe eines achromatischen Fernrohres, wie wir es weiter unter beschreiben werden. Um dasselbe aber anwenden zu können, muß man zwischen das Prisma und den Spalt eine (achromatische) Sammellinse in der Entfernung ihrer Brennweite einschalten, damit die vom Spalte ausgehenden Strahlen zunächst parallel werden, so als ob sie von einem sehr entfernten Punkte kämen. Ebenso muß man auch die

Scala, um ihr Bild im Fernrohre zugleich mit dem des Spaltes zu erblicken, im Brennpunkte einer zweiten Linse aufstellen. Dieses ist im Princip die Construction des Spectroskopes, welche ihm von Kirchhoff gegeben wurde. Dasselbe leidet, so einfach und vollkommen es auch gegenüber den früheren zur Beobachtung des Spectrum angewandten Vorrichtungen erscheint, an dem Uebelstande, daß man, da die Richtung der mit dem Spalte versehenen Röhre nicht mit derjenigen des Fernrohres zusammenfällt, die Lichtquelle nicht direct anvisiren kann, was für manche Zwecke, namentlich bei astrophysischen Untersuchungen (Untersuchungen der Gestirne in Bezug auf ihre Beschaffenheit) sehr wünschenswerth ist. Für diesen Zweck hat man das Spectroskop à vision directe. Dasselbe befindet sich gewöhnlich in der Achse eines großen astronomischen Fernrohres und wird meistens mit dem Ocular desselben in Verbindung gebracht. Richtet man das Fernrohr mit Hülfe des sogenannten Suchers auf den zu beobachtenden Stern, so erblickt man zugleich dessen Spectrum. Bei dem Spectroskope à vision directe müssen, wie aus dem Obigen hervorgeht, die aus dem Prisma hervortretenden Strahlen den auf dasselbe fallenden parallel sein. Dies kann man entweder durch einen passend angebrachten drehbaren Spiegel, auf den man die farbigen Strahlen fallen läßt, erreichen, oder aber besser, indem man Prismen von verschiedenen Glassorten, nämlich Flintglas und Crownglas so combinirt, daß ihre brechenden Kanten entgegengesetzt liegen. Dadurch kann man bewirken, daß die Ablenkung der Lichtstrahlen aufgehoben wird, nicht aber die Farbenzerstreuung. Das Flint- oder Krystallglas, welches sich durch seinen starken Bleigehalt vom gewöhnlichen Glase unterscheidet, besitzt nämlich ein stärkeres Farbenzerstreuungsvermögen als das Crownglas, dagegen ein fast eben so starkes mittleres Brechungsvermögen. Wenn man daher zwei Prismen von gleichem brechenden Winkel, das eine aus Flintglas, das andere aus Crownglas mit entgegengesetzter Lage der Kanten (so daß die Prismen zu einander liegen wie die Diagonalen-Dreiecke eines Parallelogrammes) vereinigt, so werden die Lichtstrahlen ähnlich wie bei einer dicken Glasscheibe zwar seitlich verschoben, im Uebrigen aber zu ihrer

ursprünglichen Richtung parallel, jedoch farbig aus dem Doppelprisma hervortreten. Gewöhnlich combinirt man 3, 5 oder 7 oder noch mehrere einfache Prismen und zwar so, daß immer ein Flintglasprisma mit einem solchen von Crownglas abwechselt. In neuerer Zeit (seit 1868) ist es gelungen, mit dem Spectroscope die Linien der Protuberanzen, welche man früher nur bei totalen Sonnenfinsternissen und auch dann nur bei heiterem Himmel, also verhältnißmäßig sehr selten beobachten konnte, auch bei hellem Sonnenschein wahrzunehmen, wenn man das Spectroskop auf den Sonnenrand einstellt, so daß der Spalt denselben tangirt. Diese wichtige Vervollkommung des Spectroskopes wurde fast gleichzeitig von Jansen und Lockyer erfunden; der Astronom Kayser in Danzig hat durch eine sinnreiche Vorkehrung, indem er das Spectroskop mit einer excentrischen Scheibe in Verbindung brachte, es möglich gemacht, dasselbe durch eine einfache Drehung des Oculars um den ganzen Sonnenrand herumzuführen, wenn das Fernrohr einmal richtig eingestellt ist. Zöllner und Anderen ist es sogar gelungen ein Spectroskop herzustellen, in welchem man nicht nur die Linien der Protuberanzen sondern sogar ihre ganze Form sieht. Dieselben zeigen sich sehr veränderlich; zuweilen erscheinen sie baumförmig, so daß sie an die bei vulkanischen Eruptionen sich bildenden Rauchwolken erinnern, häufiger jedoch in Form einer Pyramide mit breiter Basis, welche nach den von Tachini und anderen italienischen Spectroskopikern ausgeführten Zählungen etwa 92 Procent aller Protuberanzen haben. Wahrscheinlich ist nach Lockyer die ganze Oberfläche der Sonne von einer etwa tausend Meilen dicken Schicht (der obengenannten Chromosphäre) bedeckt, welche dieselben hellen Linien, also hauptsächlich die des Wasserstoffs, wie die Protuberanzen zeigt und daher im Wesentlichen mit ihnen identisch ist. Es sei noch bemerkt, daß sich ein gewisser Zusammenhang zwischen den Protuberanzen und Sonnenflecken gezeigt hat, endlich, daß beim Auftreten zahlreicher und großer Sonnenflecken auch magnetische Störungen auf der Erde bemerkt worden sind.

Nicht nur die Sonne, sondern auch die Planeten, Kometen und den größten Theil der helleren Fixsterne und Nebel hat man

bereits spectroskopisch untersucht und so festgestellt, daß viele Fixsterne eine der Sonne ähnliche Constitution besitzen müssen. Sie zeigen zahlreiche dunkle Linien, welche schließen lassen, daß in ihnen meistens dieselben Stoffe wie in dem Körper unseres Sonnensystems enthalten sind; jedoch bemerkt man auch Linien, welche keinem irdischen Stoffe anzugehören scheinen. Einige Nebelflecke zeigen ebenso wie der Körper einiger Kometen helle Linien, befinden sich also noch im gasförmigen Zustande, wie nach der Kant-Laplace'schen Hypothese ehemals auch unser Sonnensystem. Die Planeten dagegen zeigen nur die Fraunhofer'schen Linien, sind daher — mit Ausnahme vielleicht des Jupiter — nicht selbstleuchtend, folglich abgekühlt. Daß der Mond keine Atmosphäre hat, bestätigt auch die spectroskopische Untersuchung; dieselbe müßte nämlich Absorbtionsstreifen zeigen, wie sie thatsächlich zuweilen, namentlich bei tieferem Stande der Sonne durch die Erdatmosphäre, wie es scheint besonders durch den in ihr enthaltenen Wasserdampf, im Sonnenspectrum hervorgerufen werden.

Das Spectroskop hat noch manche andere Aufschlüsse über die physische Beschaffenheit der Gestirne geliefert, von welcher man seit seiner Einführung in die Astronomie in kaum einem Decennium mehr erforscht hat, als vorher in Jahrhunderten; doch erlaubt uns der Zweck dieses Buches nicht, näher auf diesen Gegenstand einzugehen. Wir verweisen deshalb Leser, welche sich für denselben interessiren, auf die Schrift des ausgezeichneten Spectroskopikers W. Huggins.*

15. Achromatische Prismen. — So wie man das ungleiche Farbenzerstreuungsvermögen des Flint- und Crownglases benutzen kann, um durch Zusammensetzung zweier Prismen aus beiden Glassorten die Ablenkung der durchgehenden Lichtstrahlen nicht aber die Farbenzerstreuung aufzuheben, so läßt sich dadurch auch die entgegengesetzte Wirkung erzielen, also ein zusammenge-

---

* Ergebnisse der Spectral-Analyse in Anwendung auf die Himmelskörper. Deutsch mit Zusätzen von W. Klinkerfues. Leipzig, Quandt und Händel. 3. Auflage, 1873.

setztes Prisma construiren, welches zwar eine Ablenkung, aber keine Farbenzerstreuung hervorbringt. Dies ist das achromatische Prisma. Zu dem beabsichtigten Zwecke muß man nach dem Obigen den brechenden Winkel des Flintglasprismas kleiner nehmen als den des Crownglasprismas. Weil indessen bei der Zusammenstellung zweier Prismen die Farbenzerstreuung, auch wenn sie für die äußersten (rothen und violetten) Strahlen vollständig aufgehoben ist, nicht zugleich auch für die mittleren Strahlen ganz verschwindet, so combinirt man gewöhnlich wenigstens zwei Crownglasprismen mit einem Flintglasprisma, wodurch die beabsichtigte Wirkung vollkommener hervorgebracht wird. Aehnliches gilt für die später zu beschreibenden achromatischen Linsen.

16. Linsen und Linsengesetze. — Aehnlich wie durch Reflection an Spiegeln mit kugelförmig gekrümmter Oberfläche, kann man auch durch Brechung in Gläsern oder anderen durchsichtigen Körpern, welche auf beiden Seiten durch Theile von Kugeloberflächen begrenzt sind, Bilder von Lichtobjecten hervorrufen. Derartige Körper nennt man Linsen. Man unterscheidet Sammellinsen (auch Vergrößerungsgläser oder Brenngläser genannt) und Zerstreuungslinsen (oder Verkleinerungsgläser). Die ersteren nennt man in der wissenschaftlichen Sprache auch Convexlinsen weil bei ihnen die erhabene oder convexe Krümmung überwiegt, sie deshalb von der Mitte nach dem Rande hin dünner werden, während die Zerstreuungslinsen auch Concavlinsen heißen, weil bei ihnen die concave oder hohle Krümmung stärker ist, ihre Dicke deshalb nach dem Rande hin zunimmt.

Unter den Convexlinsen unterscheidet man biconvexe, planconvexe, concavconvexe, je nachdem die Oberfläche auf beiden Seiten erhaben gekrümmt, oder auf einer eben oder endlich auf einer Seite hohl ist; ebenso zerfallen die Zerstreuungslinsen in biconcave, planconcave, convexconcave. In Bezug auf die durch sie erzeugten Bilder entsprechen die Sammellinsen den Hohlspiegeln, die Zerstreuungslinsen den erhabenen Kugelspiegeln. Wir betrachten zunächst die Sammellinsen. Um eine genauere

Vorstellung ihrer Form zu erhalten, nehmen wir auf einer unbegrenzten Graden zwei Punkte M und M' an und schlagen um dieselben als Mittelpunkte zwei Kreise, die sich in den Punkten L und L' schneiden mögen. Drehen wir das Ganze um die Linie $M\,M'$ als Axe herum, so beschreiben die beiden zwischen L und L' liegenden Kreisbogen die Linsenfläche. Der auf der Axe in der Mitte zwischen den beiden Kreisbogen liegende Punkt (C) wird das Centrum der Linse genannt. Strahlen welche nach demselben gerichtet sind und kleine Winkel mit der Axe bilden, werden sehr wenig abgelenkt, da die Linsenflächen in dem Punkte, wo sie von diesen getroffen werden, einander nahezu parallel gerichtet sind. Lassen wir Strahlen parallel zur Axe auffallen, so vereinigen sie sich nach zweimaliger Brechung auf der entgegengesetzten Seite der Linse in einem Punkte, den man **Brennpunkt** nennt. Man findet seine Lage durch den Versuch, wenn man Sonnenstrahlen senkrecht gegen die Mitte der Linse auffallen läßt, in den durch Brechung auf der andern Seite entstandenen Lichtkegel ein Papierblatt hält, und dasselbe so lange verschiebt, bis der darauf sichtbare Lichtkreis seine kleinste Ausdehnung hat. Die Entfernung des Brennpunktes von der Linse heißt **Brennweite**. Man ermittelt den Gang eines gebrochenen Strahles leicht nach der pag. 310 gegebenen Construction, indem man die Radien der beiden Kugeln als Einfallslothe, die Tangentenebene als brechende Fläche ansieht. Zeichnet man sich nun mehrere parallel auffallende Strahlen auf, und construirt möglichst genau die zugehörigen gebrochenen Strahlen, so ergibt sich, daß sie sich nicht genau in einem Punkte, sondern ähnlich wie die reflectirten bei Kugelspiegeln ebenfalls in einer Brennlinie vereinigen. Eine genauere Vereinigung findet nur bei sehr nahe der Mitte der Linse auffallenden Strahlen statt, und man muß daher, wenn man eine solche beabsichtigt, die Randstrahlen durch einen nur in der Mitte mit einer kreisförmigen Oeffnung versehenen Schirm, eine sogenannte „Blendung“ auffangen. Derartige Blendungen werden bei allen feineren optischen Instrumenten angewandt.

Um die Linsengesetze in ihrer einfachsten Gestalt darzustellen,

abstrahiren wir von der Dicke der Linse, die für die meisten Fälle der Praxis in der That ohne wesentliche Bedeutung ist. Dann lassen sich nämlich die Bilder durch eine einfache Construction finden, welche derjenigen ganz ähnlich ist, wie wir sie bei Kugelspiegeln angewendet haben. Wir nehmen also eine unbegrenzte gerade Linie als Axe an und eine zweite gerade Linie, welche sich in einem beliebigen Punkte *C* mit ihr unter rechten Winkeln schneidet und den Durchschnitt der Linse darstellen soll. Die willkürlich gewählte Brennweite sei gleich 2^{cm}. Wir tragen auf der Axe nach beiden Seiten vom Punkte *C* aus sowohl die einfache als auch die doppelte Brennweite ab, bezeichnen ferner den Brennpunkt auf der linken Seite durch *F*, auf der rechten Seite durch *F'*; als Lichtobject nehmen wir zunächst in der doppelten Brennweite wie früher eine zur Axe lothrechte, etwa $1{,}5^{cm}$ hohe, Linie *MN* an. Von dem höchsten Punkt *N* ziehen wir erstens einen zur Axe parallelen Strahl, welcher die Linse in *L* trifft und nach seiner Brechung in derselben durch den Brennpunkt *F'* geht, sodann ziehen wir einen durch das Centrum *C* gehenden Strahl, dessen Richtung nach dem Obigen so wenig durch die Brechung verändert wird, daß wir ohne wesentlichen Fehler ihn geradlinig annehmen können. Beide Strahlen schneiden sich unterhalb der Axe in einem Punkte *n*, welcher als das Bild von *N* anzusehen ist. Fällt man nun von *n* ein Loth *nm* auf die Axe, so ist dieses das Bild der ganzen Lichtlinie *N M*. Durch eine einfache geometrische Betrachtung erkennt man daß es dieselbe Größe wie *NM* und dieselbe Entfernung von der Linse hat. Wir haben also als erstes Gesetz folgendes: Von einem Lichtobject, welches sich in der doppelten Brennweite befindet, entsteht auf der andern Seite der Linse ebenfalls in der doppelten Brennweite ein umgekehrtes reelles Bild von derselben Größe. Dieses Gesetz entspricht vollständig dem beim Hohlspiegel, wenn sich der Gegenstand im Mittelpunkte der Kugel, also in dem Abstande eines Halbmessers, resp. zweier Brennweiten von dem Spiegel befindet.

Denken wir nun die Lichtlinie *MN* parallel zu sich selbst

auf der Axe vom Spiegel fortrückend, so bleibt die Richtung des parallelen Strahles NL, also auch die des zugehörigen gebrochenen Strahles LF' unverändert; dagegen dreht sich der Strahl NC um C und sein Winkel mit der Axe wird kleiner und kleiner, während zugleich der Punkt n sich auf der Linie NF dem Punkte F' sich mehr und mehr nähert, folglich sein Bild nm kleiner und kleiner wird, sich dem Brennpunkte nähert und endlich in ihn hineinfällt, wenn die Lichtlinie NM selbst in unendliche Entfernung gerückt ist. Demnach können wir als zweites Gesetz das folgende hinstellen: Befindet sich ein Lichtobject hinter der doppelten Brennweite, so entsteht von ihm auf der entgegengesetzten Seite der Linse ein umgekehrtes und verkleinertes Bild zwischen der doppelten und einfachen Brennweite, welches dem Brennpunkte um so näher liegt und um so kleiner ist, je weiter das Lichtobject selbst von der Linse entfernt ist.

Da man offenbar wie beim Hohlspiegel auch hier Bild und Gegenstand vertauschen kann, so erhält man durch Umkehrung des vorgenannten als drittes Linsengesetz das folgende: Von einem zwischen einfacher und doppelter Brennweite befindlichen Lichtobject entsteht auf der entgegengesetzten Seite der Linse hinter der doppelten Brennweite ein umgekehrtes Bild, welches um so kleiner und um so weiter entfernt ist, je näher das Lichtobject selbst dem Brennpunkte rückt.

Von Gegenständen, die sich im Abstande der Brennweite selbst befinden entsteht kein Bild, weil die gebrochenen Strahlen parallel aus der Linse hervortreten. Liegt das Lichtobject MN zwischen Brennpunkt und Linse, so ergibt die obige Construction, daß die Strahlen auf der entgegengesetzten Seite der Linse divergiren, also kein reelles Bild entstehen kann. Verlängert man sie rückwärts, so erhält man das geometrische Bild n' des Punktes N, resp. das des Gegenstandes selbst, wenn man von n' das Loth $n'\,m'$, auf die Axe fällt. Nach Ausführung dieser Zeichnung erkennt man sofort die Richtigkeit des folgenden, vierten Gesetzes: Von Gegenständen zwischen Linse und Brennpunkt

entstehen auf derselben Seite in größerem Abstande von der Linse aufrechte und vergrößerte Bilder. Ihre Entfernung und Größe wächst, wenn sich der Gegenstand von der Linse nach dem Brennpunkte hin entfernt.

Man kann die durch die Sammellinse erzeugten objectiven Bilder viel leichter als bei Hohlspiegeln auf einem Schirm auffangen, weil sie auf der entgegengesetzten Seite wie die Gegenstände selbst liegen. So erhält man ein verkleinertes umgekehrtes Bild der Fenster und der außerhalb befindlichen hellen Gegenstände, namentlich Wolken, wenn man die Linse der dem Fenster gegenüberliegenden Wand nähert. Ihre Entfernung von der Wand ist in diesem Falle sehr nahe gleich der Brennweite. Mit Hülfe einer Lichtflamme, welche man zwischen einfache und doppelte Brennweite hält, kann man auch die umgekehrten, vergrößerten Bilder objectiv darstellen. Die aufrechten, subjectiven Bilder sieht man z. B. bei Buchstaben, wenn man die Linse nahe über eine Druckschrift hält.

Zwischen der Entfernung des Gegenstandes von der Linse (a), derjenigen seines Bildes (b) und der Brennweite (p) besteht dieselbe Beziehung wie bei den Hohlspiegeln, indem stets

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{p}$$

ist. Die Brennweite hängt hier naturgemäß von den beiden Krümmungsradien (r und r') und vom Brechungsverhältniß (n) ab und zwar ist

$$\frac{1}{p} = (n - 1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right).$$

Die Gesetze der Zerstreuungslinsen sind in sofern einfacher, als sie ähnlich den erhabenen Spiegeln nur subjective Bilder liefern, welche stets aufrecht und verkleinert erscheinen und auf derselben Seite der Linse liegen, wie der leuchtende Gegenstand selbst. Man construirt dieselben ebenfalls mit Hülfe eines beliebig angenommenen Brennpunktes, der hier indessen, weil die parallel zur Axe auffallenden Strahlen zerstreut aus der Linse austreten, nur im geometrischen Sinne aufzufassen ist, also

durch Rückverlängerung der Strahlen erhalten wird. Man bestimmt ihn practisch mit Hülfe der Sonnenstrahlen, indem man dieselben senkrecht zur Mitte der Linse auffallen läßt und ein Papierblatt auf der andern Seite so lange verschiebt, bis der erhellte Kreis den doppelten Durchmesser wie die Linse selbst hat. Zur Construction der Bilder zeichne man sich wieder eine gerade Linie als Axe und eine zweite sich mit ihr im Punkte C rechtwinklig schneidende als Durchschnitt der Linse, die Brennweite betrage wiederum 2^{cm} und das auf derselben Seite angenommene Lichtobject MN sei etwa doppelt so weit von der Linse entfernt. Zieht man zunächst den parallelen Strahl NL so wird derselbe so gebrochen, als käme er von dem geometrischen Brennpunkte F. Der zweite Strahl NC schneidet sich mit dem ersten in n, dem geometrischen Bilde von N. Das von n auf die Axe gefällte Loth nm stellt dann das Bild von NM dar. Man erkennt leicht, daß es um so kleiner wird und dem Brennpunkte näher rückt, je weiter sich der Gegenstand von der Linse entfernt. Läßt man umgekehrt den Gegenstand sich der Linse nähern, so wird das Bild wieder größer, erreicht aber niemals die Größe des Gegenstandes selbst. Rückt letzterer in den Brennpunkt, so ist das Bild, wie man aus der Construction sofort ersieht, halb so groß, und um eine halbe Brennweite von der Linse entfernt.

17. Achromatische und aplanatische Linsen. — Das bei Betrachtung einer weißen Lichtlinie durch ein Prisma entstehende Spectrum ist, wie wir gesehen haben, eigentlich aus einer großen Zahl von Bildern der Lichtlinie zusammengesetzt, welche aneinander grenzen, resp. ineinander übergehen. Betrachtet man einen breiten weißen Gegenstand auf dunklem Grunde durch ein Prisma, z. B. ein Rechteck aus weißem Papier, welches man auf schwarzen Sammet legt, so erscheint dasselbe in die Länge gezogen und an den Rändern gefärbt, und zwar nach der Seite der brechenden Kante hin violett-blau, an der entgegengesetzten roth-gelb, weil wegen der Breite des betrachteten Gegenstandes die verschiedenfarbigen Bilder in dem mittleren Theile übereinanderfallen, folglich den Eindruck des Weißen hervorrufen, und nur an den Rändern

einerseits die am stärksten, andrerseits die am wenigsten abgelenkten Bilder hervorragen. Aehnlich erblickt man auch bei den Linsen — welche man gewissermaßen als zusammengesetzt aus vielen Prismen mit allmälig zunehmendem brechenden Winkel ansehen kann — die Bilder von hellen Gegenständen mit farbigen Rändern umgeben. Man kann dieselben durch eine dem achromatischen Prisma analoge Combination einer Crownglas- mit einer Flintglaslinse beseitigen. Soll die so herzustellende achromatische Linse als Sammellinse wirken, so muß sie aus einer convexen Crownglas- und concaven Flintglaslinse von etwas schwächerer Krümmung, folglich auch größerer Brennweite zusammengesetzt sein, so wie man auch bei dem achromatischen Prisma dem Flintglas-Prisma einen etwas kleineren Winkel geben mußte. Häufig combinirt man zwei Flintglaslinsen mit einer Crownglaslinse, welche letztere sich dann zwischen den ersteren und in unmittelbarer Berührung mit ihnen befindet.

Die achromatischen Linsen werden hauptsächlich bei photographischen Apparaten und zu Objectivgläsern für Fernröhre und Mikroskope benutzt; sie sind zuerst von Dollond (1757) hergestellt, nachdem kurz vorher (1747) Euler, Klingenstierna (1754) und Andere auf die Möglichkeit ihrer Construction hingewiesen hatten.

Wegen der ungenauen Vereinigung der gebrochenen Strahlen erscheinen die Bilder der Linse namentlich in der Nähe ihrer Ränder (vergl. pag. 333) verzerrt. Man kann diesen Uebelstand, wie schon bemerkt, einigermaßen durch Abblendung der Randstrahlen beseitigen, besser jedoch durch eine passende Wahl der Krümmungsradien, welche man durch mathematische Untersuchung bestimmt. Die Berechnung ergibt, daß eine Linse, wenn sie die geringste Verzerrung zeigen soll, keineswegs auf beiden Seiten gleich stark, vielmehr auf der einen Seite verhältnißmäßig schwach gekrümmt sein muß. Noch besser wirken passende Zusammenstellungen mehrerer Linsen, z. B. zwei mit ihren Krümmungen gegen einander gerichtete, in einer gemeinschaftlichen Hülse befestigte planconvexe Linsen; man nennt solche

Linsencombinationen, welche die Gegenstände möglichst wenig verzerrt zeigen, aplanatische.

18. Linsen-Instrumente. — Unter den optischen Instrumenten, deren Wirkungsweise aus den Linsengesetzen zu erklären ist, unterscheiden wir zwei Klassen; nämlich einfache und zusammengesetzte. Bei den ersteren ist im Wesentlichen nur eine Linse wirksam. Zu ihnen gehören die Camera obscura, das ihr ähnlich gebaute Auge, die Projectionsapparate (Zauberlaterne, Sonnenmikroskop) die Lupe und das einfache Mikroskop, die Brillen und das Stereoskop. Zur zweiten Klasse, welche also auf der combinirten Wirkung mehrerer Linsen beruht, gehören namentlich die zusammengesetzten Mikroskope und Fernrohre.

Camera obscura. Ihre Wirkung beruht auf dem zweiten Linsengesetz (pag. 335). Die Bilder heller Gegenstände, z. B. von Häusern, belebten Straßen werden durch Abhaltung fremden Lichts möglichst deutlich gemacht. Bei der einfachsten Form der Camera obscura ist in die vordere Wand eines im Innern geschwärzten Kastens vermittelst einer verschiebbaren Röhre eine Linse eingefügt und zwar so, daß ihre kleinste Entfernung von der gegenüberliegenden Wand etwa gleich der Brennweite der Linse ist; auf der Hinterwand erscheinen also die umgekehrten Bilder entfernter Gegenstände. Gewöhnlich fängt man dieselben mit einer matten Glastafel auf. Durch einen unter 45° gegen die Axe der Linse geneigten Spiegel, welcher die gebrochenen Strahlen zurückwirft, kann man bewirken, daß die Bilder statt auf der hintern auf der obern Wand erscheinen und zwar aufrecht, wenn man sie von der Rückseite des Kastens her betrachtet.

Bei den vollkommneren Apparaten dieser Art, wie sie die Photographen gebrauchen, wendet man sehr genau berechnete und geschliffene achromatische Linsen an, die man durch ein Zahnrad mit Trieb möglichst genau einstellen kann, so daß das durch die chemischen Strahlen erzeugte Bild mit möglichster Schärfe auf die Stelle fällt, an welcher sich die an Stelle des Glasschirmes eingeschobene photographisch präparirte Platte befindet. Die Krümmungen der Linsen müssen so berechnet sein, daß die Bilder in möglichst großer Ausdehnung auf einer Ebene scharf erscheinen.

Zauberlaterne, Sonnenmikroskop und ähnliche Projectiosapparate. — Bei allen so eben genannten Instrumenten kommt das dritte Linsengesetz (pag. 335) zur Anwendung. Die vergrößerten Bilder werden entweder auf eine weiße Wand oder einen Schirm von aufgespanntem Papier oder weißem Zeuge geworfen. Da mit der Vergrößerung die Helligkeit der Bilder abnimmt, so müssen die Gegenstände, deren Bilder entworfen werden sollen, stark beleuchtet werden. Bei der gewöhnlichen Zauberlaterne wird die Beleuchtung der auf Glas transparent (mit Saftfarben) gemalten Bilder von der Rückseite her durch die Flamme einer Oel- oder Petroleumlampe, deren Leuchtkraft durch Hohlspiegel und Beleuchtungslinsen verstärkt wird, (vergl. pag. 306), hervorgebracht. Die Glasbilder müssen selbstverständlich verkehrt eingeschoben werden, wenn sie aufrecht erscheinen sollen.

In der Wundercamera von Krüß beleuchtet man durch eine hellbrennende Lampe, deren Strahlen durch eine große Sammellinse concentrirt werden, kleine Papierphotographien von vorne her so intensiv, daß ihre auf einen Papierschirm geworfenen Bilder bei nicht zu starker Vergrößerung noch deutlich erscheinen.

Viel heller werden die Bilder, wenn man zur Beleuchtung Knallgaslicht, electrisches Licht oder Sonnenlicht verwendet. Das erstere wird unter anderem bei den häufig gezeigten Nebelbilder-Apparaten zur Beleuchtung benutzt. Dieselben bestehen hauptsächlich aus zwei gleichartig construirten Zauberlaternen, deren Bilder auf dieselbe Stelle eines vor beiden ausgespannten weißen Schirmes geworfen werden. Vor der Linse jedes Apparates befindet sich eine bewegliche Blendung, durch welche die Linsen mehr oder weniger verdeckt werden können. Beide Blendungen sind durch eine Gelenkstange so mit einander verbunden, daß wenn das von dem einen Apparate erzeugte Bild verdunkelt wird, das andere um so heller erscheint. Bei der mittleren Stellung der Blendungen erblickt man ein aus zwei schwachen Bildern gemischtes, also nebelhaft erscheinendes Bild. Je mehr man die Blendungen aber seitlich verschiebt, desto stärker tritt

das eine Bild hervor, während das andere allmälig verschwindet; dadurch sind verschiedene, in einander übergehende Darstellungen desselben Gegenstandes möglich. So kann man eine Sommerlandschaft in eine Winterlandschaft verwandeln, das Innere eines Gebäudes bei Tage und bei künstlicher Beleuchtung zeigen und dergl. mehr. Selbstverständlich sind dazu zwei entsprechende Abbildungen, am besten Glasphotographien desselben Gegenstandes erforderlich.

Das Sonnenmikroskop und das electrische Mikroskop unterscheiden sich nur durch die intensivere Beleuchtung und die dadurch ermöglichte stärkere Vergrößerung der abgebildeten Gegenstände von der Zauberlaterne. Beim Sonnenmikroskope wird durch einen Heliostatenspiegel (pag. 293), den man am Laden eines dunklen Zimmers befestigt, Sonnenlicht auf eine zur Beleuchtung der mikroskopischen Präparate dienende Sammellinse geleitet. Die zwischen zwei Glasplatten eingegeschlossenen Präparate selbst werden durch eine Federklemme hinter dem Brennpunkte der mikroskopischen Linse festgehalten. Ihre Entfernung von der Linse wird ähnlich wie bei den photographischen Apparaten durch ein Trieb regulirt. Statt des Sonnenlichts kann man zur Beleuchtung auch das electrische Licht benutzen, wie es zwischen Kohlenspitzen beim Hindurchleiten eines starken Stromes entsteht; zuweilen wendet man statt desselben auch das Licht des brennenden Magnesiums an.

Die durch ein Sonnenmikroskop oder ähnliche Apparate erzielte Vergrößerung ist um so stärker, je näher der Gegenstand dem Brennpunkte liegt. Aus der bei der Construction der Linsenbilder angewandten Zeichnung ergibt sich leicht, daß, wenn man durch h die Höhe des Gegenstandes, durch H diejenige seines Bildes bezeichnet, sich verhält

$$H : h = b : a.$$

Aber nach der Linsenformel (pag. 336) ist

$$\frac{b}{a} = \frac{b}{p} - 1$$

folglich auch

$$\frac{H}{h} = \frac{b}{p} - 1$$

oder, da man 1 gegen $\frac{b}{p}$ meistens vernachlässigen kann, mit hinreichender Annäherung

$$\frac{H}{h} = \frac{b}{p}.$$

Der Quotient $\frac{H}{h}$ gibt an, wie viel mal die Höhe des Gegenstandes in der des Bildes enthalten ist, bedeutet also die lineare Vergrößerung. Diese ist demnach gleich dem Quotienten aus der Entfernung des Bildes dividirt durch die Brennweite, also um so stärker je kleiner die Brennweite ist. Die Flächen-Vergrößerung erhält man, indem man die lineare Vergrößerung mit sich selbst multiplicirt. Beträgt also die erstere z. B. 100, so ist die letztere 10000; man sieht dieses leicht ein, wenn man sich statt des Gegenstandes ein Quadrat von gleicher Größe denkt.

Obgleich sich durch die so eben beschriebenen Apparate bedeutende Vergrößerungen erzielen lassen, so stehen dieselben doch wegen der geringen Schärfe der durch sie hervorgerufenen Bilder weit hinter den später zu erklärenden zusammengesetzten Mikroskopen zurück.

Lupen, einfache Mikroskope. — Es sind dieses Sammellinsen von schwächerer oder stärkerer Krümmung, bei denen man die subjectiven Bilder benutzt, welche nach dem vierten Linsengesetze (pag. 335) entstehen, wenn man den Gegenstand zwischen Linse und Brennpunkt bringt. Man muß dabei die Entfernung so reguliren, daß das subjective Bild in der deutlichen Sehweite erscheint, welche bei normalen Augen ca. 25^{cm} beträgt. Die lineare Vergrößerung bestimmt man auch in diesem Falle wie die Zeichnung lehrt, nach der Gleichung

$$\frac{H}{h} = \frac{b}{a},$$

wobei indessen angenommen ist, daß das Auge sich unmittelbar hinter der Linse befindet. Das Verhältniß $\frac{b}{a}$ ergibt sich wieder aus der Linsenformel; da aber im vorliegenden Falle das Bild auf derselben Seite wie der Gegenstand liegt, so muß man b negativ

annehmen (weil dieses auf der entgegengesetzten Seite von der Linse positiv gerechnet wurde). Die Formel lautet demnach

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{p}$$

oder

$$\frac{b}{a} = 1 + \frac{b}{p}$$

mithin

$$\frac{H}{h} = 1 + \frac{b}{p}.$$

Da aber hier b gleich der Sehweite (s) ist, so hat man auch, wenn man wiederum 1 gegen $\frac{b}{p}$ vernachläßigt

$$\frac{H}{h} = \frac{s}{p}$$

die lineare Vergrößerung ist also gleich dem Quotienten aus der Sehweite und der Brennweite.

Um die Vergrößerung einfacher Lupen durch den Versuch zu bestimmen, zieht man sich ein System von parallelen Linien in einem Abstande von ca. 1^{mm} und betrachtet dieselben mit einem Auge durch die Lupe, mit dem andern direct und ermittelt so durch unmittelbare Vergleichung, über wie viele der direct gesehenen Linien sich der Abstand zweier derselben in dem zugleich erblickten Bilde erstreckt.

Schwach vergrößernde Lupen sind die Linsengläser, wie sie von den Uhrmachern oder zum Zählen der Fäden eines Gewebes benutzt werden. Diejenigen Lupen welche die Naturforscher zum Untersuchen der Pflanzen und Insecten benutzen, vergrößern meistens auch nur zwei- oder dreimal. Durch Verbindung mehrerer Lupen (Doublets, Triplets) kann man nicht nur stärkere Vergrößerungen hervorbringen, sondern auch nach pag. 338 richtigere Bilder erhalten. Plößl in Wien lieferte schon vor vierzig Jahren Lupen aus zwei achromatischen Doppellinsen, welche bis 60 mal vergrößerten. Die einfachen Mikroskope sind Linsen von kurzer Brennweite, die man wegen der stärkeren Vergrößerung, welche sie hervorbringen, mit passendem Stativ zur Befestigung und Beleuchtung der Objecte versehen hat.

Das Auge. — Seinem Baue und seiner Wirkungsweise

nach ist das Auge einer camera obscura durchaus ähnlich, indem in ihm wie in dieser verkleinerte und umgekehrte Bilder derjenigen Gegenstände entstehen, auf welche wir unseren Blick richten. Die äußere Hülle des Augapfels wird durch die harte (weiße) Haut dargestellt. Die darunter liegende schwarze, undurchsichtige Aderhaut, welche den Albinos fehlt, dient zur Abhaltung des störenden seitlichen Lichtes. Die Lichtstrahlen, durch welche die Gesichts-Wahrnehmungen erzeugt werden, dringen durch die vorne in die weiße Haut eingefügte, durchsichtige Hornhaut (Cornea) in das Auge ein. Hinter der Hornhaut befindet sich die, meistens braun oder blau gefärbte Regenbogenhaut, welche in der Mitte eine kreisförmige Oeffnung — die Pupille — hat, und als Blendung für die unmittelbar dahinter anliegende, auf beiden Seiten gewölbte Krystalllinse dient. Letztere ist an dem Strahlenblättchen befestigt, welches sie ringförmig umgibt und strahlenförmig gefaltet ist; die Spannung des Strahlenblättchens kann durch einen ringförmigen, am Rande der Hornhaut entspringenden Muskel, den Ciliarmuskel, verringert werden, wodurch die Krümmung der Linsenflächen, namentlich der vorderen, stärker, folglich ihre Brennweite geringer wird. Der Raum zwischen Linse und Hornhaut, die vordere Augenkammer, ist durch die wässerige Feuchtigkeit (so genannt nach ihrem Brechungsvermögen), die hintere Augenkammer durch den Glaskörper ausgefüllt. Wässerige Feuchtigkeit, Linse und Glaskörper wirken zusammen wie eine Linse. Die durch sie hervorgerufenen Bilder werden aufgefangen durch die Netzhaut, welche die innerste Lage der den Augapfel umschließenden Häute bildet und sich demnach zwischen Glaskörper und Aderhaut befindet. Sie ist als eine Ausbreitung der Sehnerven zu betrachten und enthält die eigentlich Licht empfindende Schicht, die Stäbchenschicht, welche indessen auf ihrer hinteren Seite liegt. Diese ist gebildet aus sehr vielen feinen cylindrischen Stäbchen und etwas dickeren flaschenförmigen Gebilden, den Zapfen, welche alle dicht aneinander gedrängt sind und senkrecht zur Netzhaut stehen. Jedes dieser Stäbchen steht mit einer der Fasern des Sehnerven in Verbindung. Letz-

terer, ein cylindrischer Strang, etwa von der Dicke eines starken Bindfadens, ist äußerlich geschützt durch eine starke sehnige Scheide, welche die einzelnen Nervenfasern in sich vereinigt; er tritt in die Hinterwand des Auges ein, indeß nicht ganz in der Mitte, sondern etwas weiter nach der Nasenseite, und verbreitet sich dann nach allen Richtungen über die vordere Fläche der Netzhaut. An seiner Eintrittsstelle fehlen die Stäbchen und Zapfen, deshalb findet an derselben keine Lichtempfindung statt. Dieses ist der von Mariotte entdeckte „blinde Fleck". Man kann sich von dem Vorhandensein desselben durch folgenden Versuch überzeugen: Man mache auf dem Papier ein kleines Kreuz und rechts davon in einer Entfernung von etwa 8^{cm} einen kreisförmigen Tintenfleck von etwa 1^{cm} Durchmesser, man bringe sodann während man das Kreuz unverwandt ansieht, das Papier langsam in eine Entfernung von ca. 31^{cm}, so verschwindet der schwarze Fleck, während er bei größerer oder geringerer Entfernung von dem Auge wieder erscheint. Die so constatirte Lücke in unserem Gesichtsfelde ist groß genug, um ein etwa 2 Meter entferntes menschliches Gesicht in sich aufzunehmen, also verschwinden zu lassen.

Die Stelle des deutlichsten Sehens, wegen ihrer Farbe „der gelbe Fleck" genannt, in deren Mitte sich ein Grübchen, die Netzhautgrube befindet, liegt nahe der Mitte des Auges, etwas nach der Seite der Schläfe. Hier liegen die Zapfen am dichtesten und sind feiner (etwa $^1/_{400}{}^{mm}$ im Durchmesser) als in dem übrigen Theile des Auges. Auf diese Stelle fällt das Bild jedes Objectes, auf welches wir den Blick richten. Die von einem Lichtpunkte ausgehenden Strahlen würden bei genauer Vereinigung durch das Linsensystem des Auges auch nur ein bestimmtes Stäbchen treffen, mithin auch nur die mit ihm in Verbindung stehenden Nervenfasern reizen. Sollen zwei benachbarte Lichtpunkte in der Empfindung unterschieden werden können, so müssen wenigstens zwei verschiedene Stäbchen erregt werden. Die Raumunterscheidung durch unser Auge wird daher um so feiner sein, je zahlreicher die Stäbchen sind und je dichter sie aneinander liegen. Da ein leuchtender Gegenstand aus leuchten-

den Punkten zusammengesetzt ist, deren jeder für sich eine besondere Lichtempfindung hervorruft, die verschieden ist nach dem Orte des Lichtpunktes und dem Grade seiner Helligkeit und so gesondert zum Bewußtsein kommt, so ist es ersichtlich, wie wir vermittelst des Auges ein Urtheil über die Ausdehnung und Bewegung eines Gegenstandes, sowie über die Vertheilung von Licht und Schatten erlangen können. Wie es möglich ist, daß wir auch die Verschiedenheiten der Farbe empfinden, darüber hat bereits am Anfange dieses Jahrhunderts Thomas Young, zugleich der erste Entzifferer ägyptischer Hieroglyphen, eine sehr stichhaltige Hypothese aufgestellt, welche in neuerer Zeit von Helmholtz adoptirt ist und eine gewisse Aehnlichkeit mit der, von letztgenanntem Forscher über die Thätigkeit des Corti'schen Organes bei Tonempfindungen aufgestellten hat. Young nimmt an, daß es im Auge dreierlei Arten von Nervenfasern gebe, deren jede, wenn sie allein irgend wie gereizt wird, die Empfindung je *einer* bestimmten Farbe hervorruft, nämlich resp. die des Roth, Grün oder Violett. Jede dieser drei Gattungen von Nervenfasern wird ferner vorwiegend nur durch Aetherwellen von bestimmter Länge gereizt, (ähnlich, wie nach der Helmholtz-schen Hypothese die einzelnen Corti'schen Fasern durch bestimmte Luftschwingungen erregt werden), so daß die Roth empfindenden Nervenfasern nur durch Wellenzüge von verhältnißmäßiger größerer Länge, die Grün empfindenden durch Wellen mittlerer, die Violett empfindenden durch Wellen geringster Länge am stärksten erregt werden. Denken wir uns die Strahlen des Spectrums, von dem rothen Ende anfangend, bei dem Auge vorübergeführt, so würden also durch die äußersten sichtbaren Strahlen die Roth empfindenden Fasern am stärksten erregt werden, allmälig würde die Erregung der *Grün* empfindenden Fasern hinzukommen, dadurch die gemischte Empfindung des *Gelb* entstehen, &c. Diese Hypothese wird nicht nur durch alle an normalen Augen angestellten Untersuchungen bestätigt, sondern erhält namentlich auch dadurch einen hohen Grad von Wahrscheinlichkeit, daß sich aus ihr eine merkwürdige Anomalie des Sehorgans, nämlich die *Farbenblindheit* sehr einfach erklären läßt. Den mit derselben behafteten Personen fehlt die Empfindung für eine be-

stimmte Farbe, meistens die des Roth und die durch Einmischung des Roth hervorgebrachten Farbennüancen; ihnen erscheint also Scharlachroth, Weiß und Grünblau identisch oder höchstens in der Helligkeit verschieden, ebenso Purpurroth, Violett und Blau, endlich Roth, Gelb, Grün; sie sehen ferner das rothe Ende des Spectrums nicht, rothes Tuch erscheint ihnen blauschwarz. Diese thatsächlichen Erscheinungen ergeben sich als natürliche Folgen aus der Young'schen Hypothese, wenn man annimmt, daß die Roth empfindenden Fasern bei Rothblinden entweder fehlen oder unempfindlich sind, ähnlich wie sich die partielle Taubheit für gewisse Töne aus der Lähmung der gleichgestimmten Corti-schen Fasern erklären läßt; übrigens ist jeder Mensch am äußersten Ende seines Gesichtsfeldes rothblind. Läßt man längere Zeit homognes rothes Licht auf ein normales Auge fallen, so müssen die Roth empfindenden Fasern für einige Zeit ermüdet und das Auge daher vorübergehend rothblind werden. In der That hat man, wenn man diesen Versuch anstellt und gleich darauf auf einen mattweißen (grauen) Hintergrund sieht, den Eindruck des Blaugrün. Umgekehrt erscheint das Roth des Spectrums viel gesättigter, wenn man vorher einige Zeit blaugrünes Licht auf das Auge hat einwirken lassen, was sich ebenfalls nach der Young-Hypothese aus der Ermüdung der Nervenfasern außer den Roth empfindenden erklärt. Bemerkt möge noch werden, daß die Young-Helmholtz'sche Hypothese über die Farbenempfindung durch eine Entdeckung von Max Schultze einen anatomischen Beleg erhalten hat, durch welchen, wenn auch nicht in so directer Weise, wie es durch die Versuche Hensen's für die Helmholtz'sche Ansicht über die Wirkung des Corti'schen Organs geschehen ist, doch die Wahrscheinlichkeit der analogen Hypothese für das Auge erhöht wird. Der genannte Forscher hat nämlich in dem Auge vieler Vögel und Reptilien eine Anzahl von Stäbchen gefunden, welche einen rothen, andere, welche einen gelben Oeltropfen enthalten, also hauptsächlich nur durch Licht von den erwähnten Farbentönen getroffen werden können, während die farblosen Stäbchen von den blauen um so stärker afficirt werden. Man darf daher nach der Ansicht von Helmholtz in diesen Stäbchen die

Endorgane der Roth, Gelb und Blau empfindenden Nerven suchen.

Nachdem wir im Vorhergehenden allgemein angegeben haben, wie die Licht- und Farbenempfindung im Auge zu Stande kommt und wie es möglich ist, die räumliche Verschiedenheit der Lichtpunkte mittelst desselben zu erkennen, gehen wir dazu über, die Umstände zu besprechen, welche für die Deutlichkeit der Gesichtswahrnehmungen von Belang sind. Aus dem oben Gesagten folgt zunächst, daß die erste Bedingung dafür die Schärfe des auf der Netzhaut entstehenden Bildes ist, d. h. daß die von einem Lichtpunkte ausgehenden Strahlen sich auch wieder möglichst genau in einem Punkte der Netzhaut vereinigen. Liegt nämlich der Vereinigungspunkt der Strahlen vor oder hinter der Netzhaut, so entsteht statt eines hellen Punktes ein kleiner Lichtkreis, sogenannter Zerstreuungskreis, der sich über mehrere Stäbchen verbreitet, also auf verschiedene Fasern zugleich einen Reiz ausübt. Da nun die Zerstreuungskreise benachbarter Lichtpunkte theilweise über einander greifen, so werden die von nahe an einanderliegen Punkten eines Lichtobjectes ausgehenden Wirkungen sich zugleich auf mehrere Nervenfasern erstrecken, sich also in der Empfindung gegenseitig stören und dadurch undeutlich werden müssen. Da ferner nach den allgemeinen Linsengesetzen verschiedenen Entfernungen der Gegenstände auch verschiedene Entfernungen der Bilder entsprechen, so werden, so lange im Auge keine Veränderungen vor sich gehen, nur bei ganz bestimmten Entfernungen der Lichtobjecte auch scharfe Bilder auf der Netzhaut entstehen können. Nun kann man aber, wie die Erfahrung lehrt, sowohl nahe als ferne Gegenstände deutlich sehen, daraus folgt also, daß im Auge Veränderungen stattfinden müssen, die dieses ermöglichen. Um die Betrachtung möglichst zu vereinfachen, denken wir uns statt der verschiedenen optischen Medien des Auges eine einfache Sammellinse von derselben Wirkung substituirt, deren Entfernung von der Netzhaut wir ungefähr gleich dem Durchmesser des Auges, von der Hornhaut bis zur Mitte der Netzhaut, welcher etwa 22,5^{mm} beträgt, anzunehmen haben, weil wir auch sehr entfernte

Gegenstände, deren Bilder dem Brennpunkte nahe liegen, deutlich sehen können. Nehmen wir nun an, das Bild eines fernen Gegenstandes sei scharf auf der Netzhaut vorhanden, und denken wir uns diesen dem Auge genähert, so würde nach dem zweiten Linsengesetz das Bild hinter die Netzhaut rücken, also auf derselben undeutlich werden. Damit es wieder scharf erscheint, muß die Linse sich entweder stärker krümmen oder sich weiter von der Netzhaut entfernen. In Wirklichkeit findet beides statt, doch wird die Schärfe der Bilder hauptsächlich durch Veränderungen der Krystalllinse des Auges hervorgebracht. Man kann diese Veränderung an lebenden Augen nach dem pag. 308 angegebenen Princip mit Hülfe eines besonders zur Untersuchung der optischen Flächen des Auges von Helmholtz erfundenen Instrumentes, des Ophthalmometers, messen. Umgekehrt muß sich bei größerer Entfernung der betrachteten Gegenstände die Augenlinse verflachen, was durch directe Beobachtung ebenfalls bestätigt ist. Daß, wenn wir einen Gegenstand deutlich sehen, ein scharfes Bild desselben auf der Netzhautgrube vorhanden ist, hat man ebenfalls an lebenden Augen vermittelst des von Helmholtz construirten Augenspiegels erkannt. Dieses für die Augenheilkunde ungemein wichtige Instrument besteht in seiner einfachsten Gestalt aus einem in der Mitte durchbohrten Hohlspiegel, von welchem, wenn man ihn schräge gegen das Auge hält, durch die Pupille seitliches Licht in dasselbe geworfen werden kann, so daß man durch die Oeffnung des Spiegels in das erhellte Innere des Augapfels hineinsehen kann. In ähnlicher Weise hat man sich auch überzeugt, daß die Eintrittsstelle des Sehnervs gegen das Licht in der That unempfindlich ist. Man nennt die Fähigkeit des Auges, sich den verschiedenen Entfernungen des betrachteten Gegenstandes anzupassen, die Accommodationsfähigkeit.

Die Entfernung, für welche das Auge gewöhnlich accommodirt ist, wird die deutliche Sehweite genannt; es ist die Entfernung, in welcher man beim Lesen ein Buch zu halten pflegt; sie beträgt bei gesunden Augen etwa 20—25^{cm}. Der Fehler der Kurzsichtigkeit besteht darin, daß das Auge eine

zu kleine Sehweite besitzt und nicht die Fähigkeit hat, sich für größere Entfernungen zu accommodiren. Da die Bilder ferner Gegenstände in einem solchen wegen der zu starken Brechung der Lichtstrahlen vor der Netzhaut liegen, so müssen Kurzsichtige concave Linsen als Brillengläser benutzen, aus welchen (nach pag. 337) die Strahlen so gebrochen hervortreten, als kämen sie von einem der Linse, resp. dem Auge näher gelegenen Punkte, für welchen das Auge sich noch accommodiren kann.

Weitsichtigen Augen fehlt umgekehrt die Fähigkeit, sich für die Nähe zu accommodiren, die Bilder naher Gegenstände fallen demnach bei ihnen hinter die Netzhaut. Bringt man eine Sammellinse von hinreichend großer Brennweite vor das Auge, so entstehen von nahen Gegenständen nach dem vierten Linsengesetze subjective, vergrößerte Bilder, welche vom Auge weiter entfernt sind, und daher deutlich gesehen werden können. Solche Brillen wirken also ähnlich den Lupen. Auch normalen Augen erscheinen Gegenstände, die man ganz nahe an dieselben heranbringt, wegen der auf der Netzhaut sich bildenden Zerstreuungskreise undeutlich. Die Fähigkeit des Auges, sich für die Nähe zu accommodiren, hat also ihre Grenzen und ist mit einer gewissen Anstrengung verbunden, während die Accommodation für die Ferne ohne eine solche vor sich geht. Die Kurzsichtigkeit entsteht meistens durch fortgesetztes Sehen in der Nähe. Man muß sich daher hüten, beim Lesen und Schreiben das Auge dem Papier zu nahe zu bringen, weil die mit der Accommodation für die Nähe verbundenen Veränderungen des Auges mit der Zeit bleibend werden. Nicht nur die Linse, sondern auch die Iris ist gewisser Veränderungen fähig, welche automatisch, d. h. ohne unser Zuthun eintreten. Man bemerkt leicht, namentlich wenn man das Auge anderer Personen betrachtet, daß sich die Pupille zusammenzieht, wenn das Auge in helles Licht sieht, sich dagegen im Dunkeln erweitert. Bei Personen, welche, wie manche Gefangene, gezwungen waren, längere Zeit in finstern Räumen zuzubringen, hatte sich die Pupille über die ganze Iris verbreitet. Auch bei nächtlichen Thieren, z. B. Eulen und Katzen kann die Pupille außer-

ordentlich erweitert werden. Künstlich geschieht dieses durch manche narkotische Substanzen, namentlich Tollkirschensaft (Atropin), während der Giftlattich eine Verengung hervorbringt.

Wenn wir oben sagten, daß der „gelbe Fleck“, resp. „die Netzhautgrube“ die Stelle des schärfsten Sehens ist, so können wir doch auch mit den seitlichen Theilen des Auges die Gegenstände, wenngleich weniger deutlich wahrnehmen. Man unterscheidet demnach directes und indirectes Sehen. Dadurch wird das Gesichtsfeld außerordentlich vergrößert. Der Durchmesser der Netzhautgrube entspricht im Gesichtsfelde etwa nur einem Winkelgrade, während das ganze Gesichtsfeld für jedes Auge fast zwei rechte Winkel umfaßt, nämlich 160° nach rechts und links, 120° von oben nach unten.

Die Deutlichkeit der Linsenbilder wird nach §. 16 durch die sphärische und chromatische Abweichung beeinträchtigt. Auch beim Auge finden sich beide Fehler vor, wenn auch grade nicht in dem Maße, daß sie besonders störend beim Sehen hervortreten. Das Vorhandensein der ersteren läßt sich leicht beim Betrachten der Mondsichel erkennen. An klaren Abenden erblickt man bekanntlich neben dem durch die Sonne erhellten, auch noch, wenngleich bedeutend schwächer, den im Schatten liegenden Theil der Mondoberfläche, der nur durch das Erdlicht schwach beleuchtet wird. Die Hörner der hellen Mondsichel ragen weit über den dunkeln Theil hervor und scheinen einem Kreise von größerem Durchmesser anzugehören. Es müssen sich also helle Zerstreuungskreise auf der Netzhaut bilden. Deshalb erscheinen uns auch die Fixsterne größer; ihr wahrer Durchmesser, den man erst in neuerer Zeit mit Hülfe sehr vervollkommneter Fernröhre annähernd bestimmen konnte, beträgt meistens weniger als eine Secunde. Ebenso sieht auch ein helles Quadrat auf schwarzem Grunde größer aus, als ein in Wirklichkeit ebenso großes auf dunklem Grunde. Alles dieses sind Erscheinungen der „Irradiation“. Auf ihr beruht es auch, daß schwarz gekleidete Personen uns schlanker erscheinen, als solche in hellen Kleidern. Die Irradiation würde nach dem über die Wirksamkeit der Iris Gesagten bei Erweiterung der Pupille bedeutend stärker hervortreten, wenn

diese nicht vorwiegend bei schwacher Beleuchtung einträte. Bei gewissen Ungleichmäßigkeiten in den brechenden Medien des Auges, namentlich der Linse, deren Faserzüge eine sechsstrahlige Anordnung zeigen, wird nicht nur die Irradiation stärker, sondern es zeigt das betreffende Auge sogar mehrfache Bilder, so daß z. B. die Mondsichel doppelt oder dreifach erscheint, ferne Lichtpunkte in unregelmäßige strahlige Lichtfiguren verwandelt werden. Oft läßt sich der in Rede stehende Fehler des Auges, (der sogenannte Astigmatismus,) durch cylindrische Brillengläser aufheben.

Die chromatische Abweichung des Auges ist so groß, daß wenn das Auge für rothes Licht auf unendliche Entfernung eingestellt ist, seine Sehweite für Violett nur zwei Fuß beträgt. Im weißen Lichte tritt dieselbe wegen der Lichtschwäche der von den äußersten Strahlen des Spectrums herrührenden farbigen Bilder nicht hervor. Erweitert man aber die Pupille künstlich, so erscheinen alle hellen Gegenstände mit blauen und rothen Rändern. Sieht man abends nach einer Wirthshauslaterne, welche blaues (durch Kobaltoxydul gefärbtes) Glas enthält, so erblickt man eine rothe Flamme, welche von einem breiten blauvioletten Scheine umgeben ist.

Außer durch die so eben besprochenen Fehler wird eine gewisse Undeutlichkeit der Netzhautbilder durch die mangelhafte Durchsichtigkeit der Augenmedien erzeugt. Bei intensiver Beleuchtung (durch Lampenlicht und Sammellinse) erscheint der Inhalt des Augapfels trübweißlich, auch ist er fluorescirend (vergl. §. 21) was sich besonders im blauen und violetten Lichte zeigt. Die sogenannten „fliegenden Mücken" sind die Schatten von Fäserchen, Körnchen und dergl., welche im Glaskörper schwimmen. Für gewöhnlich schweben sie in dem höchsten Theile desselben, kommen aber zum Vorschein, wenn man das Auge heftig bewegt und gegen einen hellen Hintergrund, z. B. den Himmel sieht; da sie dem Blicke folgen, so glaubt man etwas fliegendes wahrzunehmen.

Der „graue Staar" besteht in Verdunkelung der Krystallinse. Um ihn zu operiren, muß man den Augapfel aufschneiden, die Krystalllinse herausnehmen und durch eine vor das

Auge gebrachte convexe Glaslinse (Staarbrille) ersetzen. Der bei der Operation zum Theil herausquellende Glaskörper wird wieder ersetzt. Der unheilbare schwarze Staar besteht in einer Lähmung der Sehnerven.

Als optisches Instrument betrachtet ist das Auge nach dem Vorhergehenden mit vielfachen Unvollkommenheiten behaftet. Seine außerordentlichen Leistungen beruhen, wie Helmholtz hervorhebt, wesentlich auf der besondern Art, wie wir es gebrauchen. „Seine Vollkommenheit ist eine rein praktische, keine absolute; sie besteht nicht darin, daß alle Fehler vermieden wären, sondern darin, daß diese Fehler den nützlichsten und mannichfaltigsten Gebrauch nicht unmöglich machen. — Ein verständiger Mann wird Brennholz nicht mit einem Rasirmesser spalten wollen, und dem entsprechend mögen wir annehmen, daß jede Verfeinerung des optischen Baues des Auges das Organ verletzlicher oder langsamer in seiner Entwickelung gemacht haben würde.“ —

Ist der von einem Körper ausgehende Lichteindruck zu schwach oder von zu kurzer Dauer, so sehen wir ihn nicht, doch nehmen wir intensive Lichterscheinungen, wie z. B. electrische Funken, Blitze auch bei kurzer Dauer wahr. Andererseits wirkt jeder Lichteindruck eine kurze Zeit, bei mäßiger Stärke etwa $^1/_{10}$ Secunde nach. Deshalb sehen wir, wenn wir eine Kohle im Kreise bewegen, hinter ihr einen Lichtschweif. Eine ähnliche Beobachtung macht man bei ausgebrannten aber noch glimmenden und sich schnell drehenden Feuerrädern. Auch die Sternschuppen scheinen Lichtstreifen am Himmel zu ziehen. Beleuchtet man ein schnell gedrehtes Rad durch schnell aufeinanderfolgende electrische Funken, so erscheint die Zahl seiner Speichen vervielfältigt und zwar entsprechend der Zahl der Funken. Dieselbe Erscheinung kann man auch bei Eisenbahnrädern beobachten, wenn dieselben von Blitzen erleuchtet werden. Alle diese Erscheinungen erklären sich durch die Annahme, daß der zuerst auf die Netzhaut ausgeübte Reiz noch nicht erloschen ist, während bereits der zweite eintritt. Auch die sogenannten Nachbilder beruhen auf einer Nachwirkung des Lichtreizes. Man erhält dieselben, wenn man unmittelbar, nachdem man einen intensiv beleuchteten Gegenstand

betrachtet hat, die Augen schließt. So bemerkt man abends nach dem Ausblasen der Lampe ein helles Nachbild derselben. Auch der dunkele resp. farbig abklingende Fleck, der sich im Gesichtsfelde zeigt, wenn man einen Augenblick in die Sonne gesehen hat, ist ein negatives Nachbild derselben. Die betreffende Stelle der Netzhaut ist für einige Zeit unempfindlich, gewissermaßen ein blinder Fleck geworden, daher erscheint sie dunkel, wenn anderes Licht in das Auge dringt. Bei geschlossenen vollkommen bedeckten Augen würde dieselbe Stelle hell erscheinen.

Wir haben bisher nur das physische Verhalten des Auges gegen das Licht besprochen; das Sehen selbst beruht, wenngleich es ohne die Mitwirkung des Auges nicht vor sich gehen kann, doch wie alle Sinneswahrnehmungen wesentlich auf einer psychischen, also geistigen Thätigkeit. Der in dem Auge ausgeübte Lichtreiz ruft zunächst im Gehirn Empfindungen hervor, und vermittelst unseres Urtheilsvermögens suchen wir auf Grund derselben uns möglichst richtige Vorstellungen über die Objecte der Außenwelt zu bilden. So wie das Lesen darauf beruht, daß wir uns gewöhnt haben, gewisse Zusammenstellungen von Buchstaben als Zeichen für Worte und Begriffe anzusehen, ohne uns bei unserer fortwährenden Uebung in der Deutung dieser Zeichen in jedem Augenblicke der geistigen Thätigkeit bewußt zu sein, welche zur Herstellung des Connexes zwischen ihnen und dem Inhalte unseres Begriffsvermögens erforderlich ist, ebenso schließen wir auch aus den Sinneseindrücken, im vorliegenden Falle aus den durch das Auge vermittelten Lichteindrücken, die wir in ähnlicher Weise wie die Buchstaben zunächst nur als Zeichen anzusehen haben, nicht nur auf das Vorhandensein von Gegenständen der Außenwelt, sondern suchen uns durch Combination der von ihnen hervorgerufenen Empfindungen eine möglichst vollständige und deutliche Vorstellung (Anschauung) von ihnen zu verschaffen. Dabei benutzen wir nicht nur die mittels eines Sinnes erhaltenen Eindrücke, sondern combiniren z. B. die durch das Auge gewonnenen namentlich mit denen des Tastsinnes. Bei der Deutung der Sinnesempfindungen verfahren wir aber stets nach dem pag. 207 angeführten für alle Sinne gültigen Gesetze, und

deshalb spielt dabei die aus vielfältiger Erfahrung hervorgehende Uebung und Gewohnheit eine wichtige Rolle. Daß dem in der That so sei, lehren namentlich die sog. Sinnestäuschungen; doch lassen sich gewisse Umstände auch bei normalen Sinneswahrnehmungen, namentlich beim Sehen, auf welche wir im Folgenden näher eingehen werden, nur aus dem erwähnten Gesetze verstehen. Eine Sinnestäuschung entsteht, wie bereits früher angedeutet wurde, jedesmal, wenn sinnliche Eindrücke auf ungewöhnliche Weise hervorgebracht werden. Wir haben zu diesem Satze in Bezug auf die Gefühlsnerven bereits in der Einleitung zur Lehre vom Schalle einige Beispiele angeführt, doch sind gerade die optischen Täuschungen zu seiner Erläuterung besonders geeignet. Es sei hier zunächst an die stroboskopischen Scheiben oder das bekanntere, auf demselben Principe beruhende „Lebensrad“ erinnert. Das letztere besteht bekanntlich aus einer um eine vertikale Axe drehbaren, oben offenen Trommel, welche an ihrem oberen Rande in gleichen Abständen mit spaltförmigen Einschnitten versehen ist. Auf der inneren Oberfläche befindet sich eine Zeichnung, welche denselben Gegenstand z. B. ein Rad auf einer Axe so viele Male darstellt, als Oeffnungen vorhanden sind, und zwar in verschiedenen Lagen, wie er sie nach der Reihe einnehmen würde, wenn er sich bewegte. Betrachtet man nun, während die Trommel gedreht wird, durch eine der Oeffnungen den auf der Innenwand gezeichneten Gegenstand, so scheint sich derselbe wirklich zu bewegen, also in unserem Falle das Rad sich zu drehen, weil der Eindruck auf unser Auge derselbe ist, wie er auch von einem sich drehenden Rade hervorgebracht werden würde.

Einen zweiten nicht minder lehrreichen Beleg zu dem obigen Satze bietet das bereits in der Akustik (pag. 244) erwähnte Stereoskop. Die Wirkung dieses sinnreichen von Wheatstone erfundenen Instrumentes besteht bekanntlich darin, daß wir statt zweier Zeichnungen eines körperlichen Gegenstandes den letzteren selbst einfach zu erblicken glauben. Der Anblick eines Körpers unterscheidet sich von dem einer Fläche hauptsächlich in zwei Punkten: nämlich erstlich durch

die andere Vertheilung von Licht und Schatten, sodann darin, daß in jedem Auge ein etwas verschiedenes Bild erscheint, sowie auch das von einer Linse entworfene Bild sich etwas verändert, wenn man dieselbe seitlich verschiebt. Diese letztere Verschiedenheit läßt sich auch durch eine perspectivische Zeichnung nicht wiedergeben, die letztere kann vielmehr genau genommen nur für ein Auge richtig sein. Fertigt man aber zwei perspectivische Zeichnungen desselben Gegenstandes an, deren jede ihn darstellt, wie er mit je einem Auge betrachtet erscheint, und legt dieselben in gleicher Entfernung von beiden Augen so hin, daß jedes Auge nur die demselben entsprechende Zeichnung erblickt, so vereinigen sich die beiden Eindrücke zu einer einzigen Anschauung und man glaubt den betreffenden Gegenstand körperlich, etwa in der Mitte zwischen den beiden Bildern zu sehen, namentlich wenn man dafür sorgt, daß die beiden Augenaxen nach dem Orte hin convergiren, wo der Körper erscheinen soll. Man bewirkt dieses entweder durch zwei vor die Augen gebrachte schwach brechende Prismen, deren brechende Kanten gegen einander gerichtet sind, oder besser durch zwei schwach vergrößernde Linsen. Die Zeichnungen müssen sich in diesem Falle innerhalb der Brennweite befinden und so gelegt werden, daß wenn man sie durch die Linsen betrachtet, die entstehenden subjectiven Bilder sich an einer zwischen den beiden Zeichnungen gelegenen Stelle decken. Am leichtesten lassen sich die stereoskopischen Zeichnungen auf photographischem Wege erzeugen. Man wendet zu diesem Zwecke entweder eine camera obscura mit zwei neben einanderliegenden Linsen an, oder nimmt denselben Gegenstand von zwei seitlich etwas verschiedenen Standpunkten auf.

Vor der Erfindung des Stereoskopes konnte man nur vermuthen, daß die Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder für die Wahrnehmung der Vertiefungen und Erhabenheiten eines Körpers nothwendig sei. Es ist in dieser Beziehung noch zu erwähnen, daß Einäugige durch seitliche Verschiebungen des Kopfes die Tiefendimensionen der von ihnen betrachteten Gegenstände zu ermitteln suchen.

Sehr entfernte körperliche Gegenstände erscheinen uns flach, weil die Verschiedenheiten der beiden Netzhautbilder bei ihnen zu

gering sind. Durch das Telestereoskop von Helmholtz (vergl. pag. 301) kann auch bei ihnen der Eindruck der Körperlichkeit hervorgerufen werden. Bei diesem Instrumente, welches dem ursprünglichen Wheatstone'schen Spiegelstereoskope einigermaßen ähnlich ist, erblickt man nämlich in zwei Spiegeln, welche unter einem rechten Winkel, dessen Kante dem Auge zugekehrt ist, zusammengestellt sind, zwei verschiedene Bilder desselben fernen Gegenstandes z. B. eines Baumes; es muß also dieselbe Wirkung wie beim Stereoskop eintreten.

Erwähnt sei noch, daß man nach Dove das Stereoskop benutzen kann, um gefälschte Werthpapiere, z. B. Banknoten, von ächten zu unterscheiden. Man bringt zu diesem Zwecke die verdächtige Note neben einer ächten an Stelle der beiden Bilder in das Instrument. Hat man es mit einem Falsificat zu thun, so treten die nicht ganz genau nachgeahmten Stellen aus der Bildebene hervor. Stellen sich nach demselben Physiker zwei Personen einander gegenüber und sehen sich mit aneinandergelegten Stirnen gegenseitig in die Augen, so scheint es jeder derselben, als ob die andere nur ein Auge in der Gegend der Nasenwurzel besäße.

So wie wir die Tiefendimensionen der Gegenstände, auf welche wir unsern Blick richten, nach dem Obigen hauptsächlich aus der Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder erkennen, schätzen wir die Entfernung naher Gegenstände aus der Convergenz der beiden Augenaxen. Es gelingt deshalb sehr schwer eine Nadel einzufädeln, wenn man ein Auge geschlossen hält. Bei der Abschätzung größerer Entfernungen wenden wir verschiedene Hülfsmittel an, wie wir sie uns an der Hand der Erfahrung durch Uebung allmälig erworben haben. Wir wissen, daß wenn sich ein Gegenstand allmälig von uns entfernt, gewöhnlich mehr und mehr andere Gegenstände zwischen ihn und unser Auge treten, während zugleich seine scheinbare Größe geringer wird. Letzteres wird dadurch bewirkt, daß sein Gesichtswinkel d. i. der Winkel, welcher die von seinen äußersten Punkten nach unserem Auge gezogenen Linien mit einander bilden, und damit die Größe der Netzhautbilder bei wachsender Entfernung abnimmt. Wir achten

demgemäß bei Abschätzung der Entfernung auf die Menge der zwischenliegenden Gegenstände und vergleichen, wenn uns die wahre Größe eines Gegenstandes aus anderweitigen Erfahrungen bekannt ist, dieselbe mit dem Sehwinkel, unter welchem er uns erscheint. Andererseits schließen wir bei bekannter Entfernung aus der Vergleichung derselben mit der scheinbaren, auf die wahre Größe. Wir wissen, daß wenn zwei verschieden entfernte Gegenstände uns unter demselben Gesichtswinkel erscheinen, der entferntere der größere sein muß. Demgemäß schließen wir auch rückwärts, daß wenn wir zwei verschieden große Gegenstände z. B. einen Mann und einen Knaben unter denselben Gesichtswinkel sehen, sie sich in verschiedener Entfernung von unserem Auge befinden müssen, halten also in dem gewählten Beispiele den Mann für weiter entfernt. Ist uns sowohl die wahre Größe als auch die Entfernung eines Gegenstandes unbekannt, so verfallen wir beim Abschätzen derselben leicht in Irrthümer und es entstehen dadurch zuweilen auffallende Täuschungen. So erscheinen uns z. B. in der Luft schwebende Vögel kleiner als sie in Wirklichkeit sind, weil wir ihre Entfernung von unserem Auge zu gering abschätzen. Ebenso halten wir gewöhnlich einen Fluß für schmäler als er ist, weil die glatte Wasserfläche uns zu wenig Anhaltepunkte für unsere Schätzung bietet. Personen auf den Ackerfeldern, welche wir aus einem in voller Fahrt begriffenen Eisenbahnzuge betrachten, sehen auffallend klein aus, weil bei der schnellen Bewegung in unserem Auge die Unebenheiten des Bodens verwischt werden und wir deshalb die Entfernung ähnlich wie beim Ueberblicken einer Wasserfläche für geringer halten. Umgekehrt erscheinen uns die Sonne und der Mond am Horizonte auffallend groß, weil wir dieselben wegen der Menge der bei tiefem Stande zwischen ihnen und unserem Auge befindlichen Objecte für entfernter halten. Daß hier wirklich eine Täuschung vorliegt, ergiebt die Messung mit genauen Winkelinstrumenten, welche gezeigt hat, daß die scheinbaren Durchmesser der genannten Gestirne am Horizonte nur um eine ganz geringfügige, für das Augenmaß nicht merkliche Größe von derjenigen verschieden ist, welche man bei höherer Stellung findet. Uebrigens mag

auch der Umstand, daß die Gegenstände am Horizonte uns wegen der auf der Erdoberfläche namentlich abends und morgens lagernden Dünste verschleiert erscheinen, auf die falsche Abschätzung der Entfernung von Einfluß sein. Weil wir im Allgemeinen die Conturen sehr entfernter Gegenstände nur undeutlich erkennen können, so glauben wir, wenn derselbe Anblick durch andere Umstände hervorgerufen wird, auf eine größere Entfernung schließen zu müssen, während andererseits, wenn wir bei durchsichtiger Luft und guter Beleuchtung die Umrisse ferner Objecte scharf erkennen können, uns die Entfernung derselben geringer erscheint. Diese Täuschung tritt namentlich bei hell beleuchteten Winterlandschaften und in der klaren Luft des Hochgebirges ein.

Wenn schon aus dem Vorhergehenden folgt, eine wie wichtige Rolle bei dem Zustandekommen der durch unser Auge gewonnenen Anschauungen der intellectuellen Thätigkeit, die allerdings wesentlich durch die Erfahrung geleitet wird, zufällt, so zeigt sich dieses in mancher Beziehung noch evidenter bei dem normalen Sehen. Nur auf diese Weise läßt es sich erklären, *daß wir die Gegenstände der Außenwelt trotz der umgekehrten Lage ihrer Bilder im Auge aufrecht erblicken und zwar bei jeder Neigung des Kopfes.* Wir haben uns offenbar, wahrscheinlich durch die vielfachen Erfahrungen, welche wir mit Hülfe des Tastsinnes bereits in unserer frühesten Jugend gesammelt haben, gewöhnt, die leuchtenden Punkte, deren Bilder in unserem Auge entstehen, in der Rückverlängerung der Richtungen zu suchen, welche die von ihnen ausgehenden Strahlen bei ihren Eintritte in unser Auge haben. Daß das Sehen in der That *gelernt* werden muß und keineswegs eine angeborene Fähigkeit ist, lehren schon die Beobachtungen, welche man an kleinen Kindern machen kann, die offenbar noch nicht verstehen, die Gesichtsempfindungen zu deuten, daher in die Flamme, nach dem Monde greifen, alles mit der Zunge und den Händen betasten u. dgl. m.; namentlich aber zeigen die Erfahrungen an blindgeborenen Personen, welche im späteren Alter durch eine glückliche Operation ihr Augenlicht erlangten, daß auch bei gereiftem Urtheilsvermögen die Deutung der Em-

pfindungen gelernt werden muß. Dergleichen Individuen erkennen nämlich in der ersten Zeit nach Erlangung des Sehvermögens die ihnen bekannten Gegenstände mit Hülfe des Auges erst wieder, wenn sie dieselben berühren, können eine Kugel von einem Kreise nicht unterscheiden, eine Gemälde erscheint ihnen zunächst nur als bunte Fläche; später wenn sie die Gegenstände die es darstellen soll, erkennen, wundern sie sich, daß sie beim Betasten desselben keine Erhabenheiten und Vertiefungen fühlen 2c.

Daß wir die Gegegenstände, auf welche wir gerade unseren Blick richten einfach und zwar körperlich sehen, es dagegen für gewöhnlich nicht bemerken, daß uns wegen der zweifachen Bilder in beiden Augen, alle anderen doppelt erscheinen, daß wir den blinden Fleck im Auge nicht wahrnehmen, erwähnen wir noch als Belege zu den auf pag. 243 und 244 gemachten Bemerkungen, aus denen der Leser die Erklärung der angeführten Erscheinungen selbst finden wird.

Vergleichen wir nun noch schließlich das Auge des Menschen mit dem der Thiere, so zeigt sich zunächst eine große Uebereinstimmung in dem Baue desselben mit dem bei den Säugethieren und Vögeln. Bei den Fischen ist die Linse sehr stark gekrümmt, fast kugelförmig. Wir würden im Wasser, wegen der zu geringen Brechung der Lichtstrahlen beim Uebergange in unser Auge weitsichtig sein. Eigenthümlich sind die Augen der Insecten z. B. der Fliegen und Heuschrecken gebaut. Dieselben sind nämlich, ähnlich wie die Honigwaben der Bienen, aus vielen nach unten spitz zulaufenden Zellen zusammengesetzt, deren Wände undurchsichtig sind. Im Grunde jeder Zelle entsteht ein Bild der Punkte, welche in der Verlängerung ihrer Axe liegen. Das Gesammtbild setzt sich daher mosaikartig aus den in jeder Zelle entstehenden Theilbildchen zusammen. Viele Insecten haben außerdem noch einfache Linsenaugen, die sie, wie es scheint namentlich zum Sehen in der Nähe gebrauchen. Noch tiefer stehende Thiere, wie die Seesterne, Quallen und Infusorien, können zwar hell und dunkel wie es scheint unterscheiden, haben aber meistens keine eigentlichen Augen, sondern nur

lichtempfindliche Punkte an den Nervenenden. Bei noch einfacheren Thierformen fehlen selbst diese, ohne daß dadurch eine vollständige Unempfindlichkeit gegen das Licht bedingt wäre.

Photographie. — Die Einrichtung des photographischen Apparates wurde bereits pag. 339 beschrieben, wir haben daher nur noch das Verfahren zur Herstellung der Lichtbilder zu erläutern. Dasselbe beruht, wie bereits früher angedeutet wurde, auf der chemischen Wirkung des Lichtes. In dem Sonnenspectrum zeigt sich, wie wir (pag. 320) gesehen haben, die chemische Wirkung am stärksten bei den violetten und ultravioletten dunkeln Strahlen. Um eine Platte zur Erzeugung eines Lichtbildes zu präpariren, muß man dieselbe zunächst mit einer gegen das Licht empfindlichen Schicht überziehen, welche durch die Lichtstrahlen eine chemische Zersetzung erleidet. Bei dem älteren, von Daguerre im Jahre 1838 etwa erfundenen Verfahren brachte man zu diesem Zwecke eine polirte Silber- oder eine versilberte Kupfer-Platte über Joddämpfe, wodurch sich auf derselben ein lichtempfindlicher Ueberzug von Jodsilber bildete. Die so präparirte Platte wurde an die Stelle des Bildschirmes der camera obscura gebracht und nachdem sie eine Zeit lang belichtet war, in Quecksilberdämpfe gehalten. Diese schlagen sich an den vom Lichte getroffenen Stellen nieder und durch diesen Quecksilberhauch wurde das Bild sichtbar gemacht.*

Durch eine geeignete Salzlösung (Kochsalz oder besser unterschwefligsaures Natron) wird endlich der unzersetzte Theil des Jodsilbers abgewaschen und die Platte so vor der weiteren Einwirkung des Lichtes geschützt. Darin besteht also die Fixirung des Bildes.

Bei den nach dem Daguerre'schen Verfahren hergestellten Lichtbildern wirkt der Glanz der Silberplatten sehr störend. Sie sind deshalb allmälig durch Papierphotographien verdrängt worden, deren Herstellungsweise noch vor dem Bekanntwerden der Daguerre'schen Entdeckung von dem Engländer Talbot erfunden

* Bekanntlich erhält man auch, wenn eine Münze längere Zeit auf einer gut polirten Platte gelegen hat, durch Behauchen der letzteren ein deutliches Bild des Gepräges.

wurde. Dieser machte das Papier dadurch lichtempfindlich, daß er dasselbe zuerst in eine Lösung von Kochsalz (Chlornatrium), darauf in eine solche von Höllenstein (salpetersaures Silberoxyd) tauchte. Dadurch entsteht eine Chlorsilberschicht. Bei der Belichtung in der camera werden nun die hellsten Stellen am dunkelsten. Man erhält also zunächst ein negatives Bild, welches man auf die oben angegebene Weise fixiren kann. Von diesem erhielt Talbot durch Wiederholung desselben Verfahrens ein positives Bild, in welchem die Vertheilung von Licht und Schatten der Wirklichkeit entsprach. Später ersetzte man bei Herstellung der negativen Bilder das Papier durch Glas. Dieses wird zunächst mit einer Schicht von Stärkelösung, Eiweis oder Collodium (Schießbaumwolle in Aether) überzogen und darauf lichtempfindlich gemacht. Die durch Belichtung in der camera erhaltene Negativplatte bringt man, nachdem man das Bild auf ihr fixirt hat, über ein präparirtes Papier und setzt sie längere Zeit dem zerstreuten Tageslicht aus. Dann entsteht auf dem Papier ein positives Bild, welches nur noch fixirt werden darf.

Farbige Photographien direct durch Einwirkung des Lichtes herzustellen, ist bisher nicht gelungen. Doch lassen sich die Papierphotographien durch Anilinfarben coloriren. Wenn man eine Silberplatte durch Einwirkung von Chlor lichtempfindlich macht und auf ihr ein lichtstarkes Sonnenspectrum entwirft, so entstehen allerdings durch Zersetzung der Chlorsilberschicht durch das Licht Farben, welche, wenngleich matter als die Spectralfarben, denselben doch ähnlich sind. Sie verschwinden aber sehr bald und es ist noch nicht gelungen, sie zu fixiren. Dagegen hat man das photographische Verfahren wesentlich durch Verbindung desselben mit den graphischen Künsten erweitert. Man hat allmälig gelernt, Stein-, Kupfer-, Stahl- und Holzplatten photographisch zum Druck vorzubereiten. Bei der Photolithographie überzieht man zu diesem Zwecke die Steinplatte mit einer Auflösung von Asphalt in Aether, welche nach dem Trocknen einen körnigen Grund hinterläßt. Legt man nun eine Negativplatte auf und belichtet, so werden dadurch die hellen Stellen unlöslich, und man kann daher durch Abwaschen mit Aether das

Bild fixiren. Wäscht man den Stein darauf mit Wasser und benetzt ihn mit Buchdruckerschwärze, so haftet diese nur an den Asphaltpartieen und man erhält Abdrücke, welche den mit lithographischer Kreide gemachten Zeichnungen ähnlich sind.

Die Photographie hat ferner sehr wichtige Anwendungen sowohl in der Astronomie als auch in der Physik und den beschreibenden Naturwissenschaften gefunden, doch erlaubt uns der Zweck dieses Buches nicht näher darauf einzugehen.

Optische Instrumente, deren Wirkung durch mehrere Linsen hervorgebracht wird. — Fernrohre. Bei allen Fernrohren werden Bilder ferner Gegenstände in der Nähe des Auges hervorgerufen und zwar so, daß sie in der deutlichen Sehweite unter einem größeren Gesichtswinkel erscheinen, als wenn man sie mit bloßem Auge betrachtet. Die Bilder können entweder durch Linsen allein oder durch Mitwirkung von Hohlspiegeln erzeugt werden, und man unterscheidet demnach dioptrische Fernrohre (Perspective, Refractoren) und katoptrische Fernrohre (Spiegelteleskope).

Die ersteren bestehen aus einer größeren Sammellinse, welche man das Objectiv nennt, und einer kleineren, der Ocularlinse; jene wird dem zu betrachtenden Objecte zugekehrt, diese vor das Auge gehalten. Unmittelbar hinter dem Brennpunkte des Objectivs entsteht ein umgekehrtes und verkleinertes Bild des betrachteten Gegenstandes, welches durch die Ocularlinse wie durch eine Lupe vergrößert wird. Ein derartiges nur aus zwei Linsen bestehendes Fernrohr, in welchem die Gegenstände demnach in verkehrter Lage erscheinen, ist das astronomische oder Keppler'sche. Dasselbe wird, außer von den Astronomen, in kleinerem Maßstabe auch von den Physikern als Beobachtungsfernrohr angewandt. Im Brennpunkte des Objectivs ist gewöhnlich ein Fadenkreuz (Spinnfäden) ausgespannt, welches man zugleich mit dem Bilde des betrachteten Objectes sehen kann. Man kann mit einem solchen Fernrohre sehr genau nach bestimmten Richtungen visiren und bildet dasselbe daher einen wesentlichen Bestandtheil von Präcisionsinstrumenten, namentlich solchen, welche zum Nivelliren oder Winkelmessen dienen. Der-

artige Fernrohre müssen natürlich eine feste Aufstellung haben, jedoch so, daß sie um zwei Axen drehbar sind, um in jede Lage gebracht werden zu können. Ist die eine Axe zur Weltaxe parallel, so nennt man die Aufstellung parallactisch. Hat man ein so aufgestelltes Fernrohr auf irgend einen Stern gerichtet, und wird dasselbe durch ein Uhrwerk in 24 Stunden einmal herumgedreht, so bleibt der Stern fortwährend im Gesichtsfelde. Das astronomische Fernrohr hat den Vorzug großer Lichtstärke. Es ist offenbar unwesentlich, ob man das Bild eines Himmelskörpers aufrecht oder umgekehrt erblickt; bei Betrachtung irdischer Gegenstände würde letzteres hingegen störend sein. Deshalb befindet sich bei dem terrestrischen Fernrohre, welches man zur Betrachtung irdischer Gegenstände anwendet, zwischen dem Objectiv und Ocular wenigstens noch eine dritte Linse, durch welche die Umkehrung der vom Objecte hervorgerufenen Bilder bewirkt wird.

Die Helligkeit der Bilder hängt abgesehen von der Durchsichtigkeit des Glases und der Lichtstärke der betrachteten Objecte wesentlich von der Größe des Objectivs und der Vergrößerung ab. Die Schärfe der Bilder ist durch mehrere Umstände bedingt. Einmal müssen die Linsen aus gleichförmigem, schlierenfreien Glase verfertigt, sodann aber müssen sie richtig berechnet und geschliffen, endlich gut centrirt sein, d. h. so gefaßt, daß die optischen Mittelpunkte aller in derselben geraden Linie, der optischen Axe des Instrumentes, liegen. Ebenso muß auch die Ocularlinse aplanatisch sein. Man setzt dieselbe daher aus den auf pag. 338 angegebenen Gründen beim terrestrischen Fernrohre gewöhnlich aus 4 Linsen zusammen, von denen die 3 ersten zur Umkehrung des im Brennpunkte der Objectivlinse entstehenden Bildes dienen, während die letzte erst als Lupe wirkt, demnach die eigentliche Ocularlinse bildet. Diese Linsen sind bei dem gewöhnlichen Handfernrohre zu zweien durch eine gemeinschaftliche Fassung verbunden und jedes Paar ist wiederum in die beiden Mündungen des Ocularauszuges eingeschoben.

Die Fassungen der Fernrohre sowie aller Linseninstrumente, welche theils zur Verbindung der Linsen theils zur Abhaltung

fremden Lichtes dienen, sind wie der Augapfel im Innern geschwärzt. Außerdem sind an den Stellen, wo die Bilder erscheinen, zur Abhaltung der Randstrahlen ringförmige Blendungen angebracht, wodurch die Schärfe der Bilder erhöht wird.

Größere Fernrohre prüft man am besten auf ihre Güte indem man dieselben auf Doppelsterne oder Sternhaufen richtet, welche durch sie aufgelöst werden müssen. Außerdem muß jeder Stern als Lichtpunkt, nicht scheibenförmig erscheinen, (wenn man es nicht gerade mit einem Planeten zu thun hat). Bei kleineren genügt die Betrachtung entfernter Firmenschilder oder Druckschriften. Ein genaueres Urtheil gewinnt man, wenn man sich auf einem Blatte Gruppen von Linien zieht, deren Annäherung mehr und mehr zunimmt und untersucht, welche Gruppe noch aufgelöst wird. Auf diese Art kann man namentlich die Leistungen verschiedener Fernrohre mit einander vergleichen. Um sich zu überzeugen, ob die Linsen richtig centrirt sind, drehe man das Fernrohr, während man ein scharfes Bild eines Gegenstandes im Gesichtsfelde hat, um seine Axe. Das Bild darf dann nicht seine Form verändern. Sind die Blendungen richtig gestellt, so muß man vom Rande des Objectivs durch das Ocular hindurchsehen können.

Will man ein Fernrohr benutzen, so zieht man dasselbe zuerst vollständig aus, legt das Objectiv-Ende auf die linke Hand, die man am besten unterstützt, visirt (wie beim Zielen) über das Rohr hinweg nach dem zu betrachtenden Gegenstande und sieht dann erst in das Ocular, indem man zugleich das letztere mit der rechten Hand langsam unter drehender Bewegung einschiebt, bis die Bilder die größte Schärfe erreicht haben. Kurzsichtige müssen nach pag. 350 das Ocular weiter einschieben als Weitsichtige. Es ist bequem, sich durch eine eingeritzte Marke diejenige Stellung der letzten Auszugsröhre zu merken, bei welcher ferne Gegenstände deutlich erscheinen.

Die Vergrößerung hängt bei dem astronomischen Fernrohre von dem Verhältnssie der Brennweite des Objectivs zu der des Oculars ab. Wie pag. 357 erläutert wurde, ist der Durchmesser des auf der Netzhaut entstehenden

Bildes durch den Sehwinkel, unter welchem uns der betreffende Gegenstand erscheint, bestimmt. Bei kleinen Sehwinkeln, wie sie ferne Gegenstände haben, ist die Größe des Netzhautbildes zu der Größe des Sehwinkels direct proportional. Nur wird, wie man aus der Zeichnung, die man nach pag. 333 leicht anfertigen kann, erkennt, beim astronomischen Fernrohre der Sehwinkel nahezu so viel mal vergrößert, als die Brennweite des Oculares in der des Objectives enthalten ist. Die im Brennpunkte des Objectives entstehenden reellen Bilder sind nämlich nach pag. 341 um so größer, je größer die Brennweite der Objectivlinse ist. Die Vergrößerung der von dieser durch das Ocular erzeugten subjectiven Bilder ist aber nach pag. 343 wiederum der Brennweite der Ocularlinse umgekehrt proportional.

Da der Abstand bei den Linsen sehr nahe gleich der Summe ihrer Brennweiten ist, so müssen stark vergrößernde Fernrohre verhältnißmäßig lang sein und, weil mit der Zunahme der Vergrößerung die Lichtstärke abnimmt, auch hinreichend große Objectivlinsen haben, da diese mehr Strahlen auffangen und zum Bilde sammeln als kleine. Practisch bestimmt man die Vergrößerung nach einer ähnlichen Methode wie bei einer Lupe. Man richtet nämlich das Fernrohr auf einen Maßstab, dessen Theilung man noch mit dem freien Auge erkennen kann und sieht wie viel Theile desselben von dem Bilde eines Theiles bedeckt werden. Ist der Maßstab z. B. in Centimeter getheilt und bedeckt das Bild eines Theiles 10^{cm} so ist die Vergrößerung 10malig. Statt des Maßstabes kann man, wenn es sich nicht um große Genauigkeit handelt, die Dachziegel eines Hauses, Gitterstäbe und dergleichen nehmen.

Von den bisher beschriebenen wesentlich verschieden sind die Holländischen oder Galilei'schen Fernrohre, welche man zu zweien verbunden in den Operngläsern findet. Bei ihnen ist die Ocularlinse concav. Durch letztere werden die von der Objectivlinse gebrochenen Strahlen, bevor sie sich zu einem Bilde vereinigen, aufgefangen und derartig umgelenkt, daß das Auge ein geometrisches (also subjectives) aufrechtes Bild erblickt. Dieses

liegt, weil die Strahlen convergent auf die Ocularlinse fallen, offenbar weiter von derselben entfernt, als der (geometrische) Brennpunkt. Der Abstand des Objectivs vom Ocular muß bei diesem Fernrohre nahezu gleich dem Unterschiede der beiden Brennweiten sein. In Bezug auf die theoretische Bestimmung der Vergrößerung gilt bei ihm dieselbe Regel wie beim astronomischen Fernrohr. Da die Strahlen aus dem Oculare divergirend austreten, also verhältnißmäßig wenige durch die Pupille in das Innere des Auges gelangen, so hat das Gallilei'sche Fernrohr nur ein kleines Gesichtsfeld und läßt schon deshalb nicht starke Vergrößerungen zu. Um dasselbe möglichst auszunutzen, muß man das Auge nahe an das Ocular heranbringen.

Katoptrische Fernrohre oder Spiegelteleskope. — Bei dieser Art von Fernrohren ist das Objectiv durch einen schwach gekrümmten Hohlspiegel gebildet. Da das nach pag. 304 unmittelbar hinter dem Brennpunkte entstehende umgekehrte Bild eines entfernten Objectes auf derselben Seite vom Hohlspiegel liegt, so muß man, um dasselbe wahrzunehmen, entweder von vorne her gegen den Hohlspiegel sehen oder aber seinen Ort durch passend angebrachte Spiegel verlegen. Das erstere ist nur bei sehr großen Instrumenten möglich, da bei kleineren ein verhältnißmäßig großer Theil des Spiegels durch den Kopf des Beobachters verdeckt werden würde.

Bei dem großen Spiegelteleskope des berühmten Astronomen Herschel, welches eine Oeffnung von 5 engl. Fuß und eine Brennweite von 40 Fuß besaß, war durch eine geringe Neigung des Spiegels das Bild an den Rand der vorderen offenen Mündung gelegt, so daß es von einem hier befindlichen Beobachter, ohne daß derselbe seinen Kopf ganz vor das Rohr bringen durfte, durch ein Ocularglas betrachtet werden konnte. Bei kleineren Spiegelteleskopen, welche gewöhnlich die von Gregory bereits 1763 vorgeschlagene Einrichtung besitzen, ist der Hohlspiegel in der Mitte durchbohrt. Die von dem noch übrigen ringförmigen Theile desselben reflectirten Strahlen werden nach ihrer Vereinigung zum umgekehrten objectiven Bilde von einem zweiten kleineren Hohlspiegel aufgefangen, der so gestellt ist, daß das

umgekehrte Bild in ein aufrechtes verwandelt wird. (Das erstere muß demnach zwischen Brennpunkt und Mittelpunkt des kleinen Spiegels liegen.) Das aufrechte Bild kann nun durch ein in die Durchbohrung des Hohlspiegels eingefügtes Ocular, hinter dem sich das Auge befindet, noch vergrößert werden. Bei dem Newton'schen Spiegelteleskope ist statt des kleinen Hohlspiegels ein unter 45° zur Axe des großen Hohlspiegels geneigter Planspiegel angebracht, der ähnlich wie bei der Camera obscura wirkt. Es werden nämlich durch ihn die von dem großen Hohlspiegel zurückgeworfenen Strahlen, bevor sie sich zum Bilde vereinigen aufgefangen, seitlich reflectirt und das entstehende reelle Bild durch eine in die Seitenwandung des Rohres eingefügte Ocularlinse betrachtet.

Da die durch den Hohlspiegel erzeugten Bilder keine farbigen Ränder zeigen, so wurden die Spiegelteleskope namentlich vor Erfindung der achromatischen Objective den Refractoren vorgezogen und hat namentlich Herschel mit den von ihm verfertigten Spiegelteleskopen eine Reihe glänzender Entdeckungen in der Astronomie gemacht. (Auflösung von Nebelflecken in Sternhaufen, Entdeckung des Uranus mit seinen Trabanten sowie vieler lichtschwachen Sterne und Nebel ꝛc.) Nachdem die Spiegelteleskope durch die namentlich durch Dollond und Fraunhofer vervollkommneten Refractoren längere Zeit in den Hintergrund gedrängt worden waren, hat man ihnen neuerdings wieder mehr Aufmerksamkeit geschenkt, seitdem es gelungen ist, durch Versilberung von Hohlgläsern sehr vollkommene und lichtstarke Hohlspiegel herzustellen. Derartige Spiegelteleskope sind namentlich von Eichens in Paris nach Anleitung Foucault's und von Steinheil in München verfertigt worden, und zwar mit parabolisch gekrümmten Hohlspiegeln. Eins der von Eichens hergestellten Instrumente von 78^{cm} Durchmesser und $4{,}5^{m}$ Brennweite befindet sich gegenwärtig in Marseille und leistet dasselbe wenn nicht mehr, wie der berühmte von Merz in München verfertigte Reflector der Pulkowaer Sternwarte. Dennoch kehrte Foucault schließlich zu den dioptrischen Fernrohren zurück.

Zusammengesetzte Mikroskope. — Diese Instru-

mente sind wie die zusammengesetzten Fernrohre aus einer Objectiv- und Ocularlinse zusammengesetzt, unterscheiden sich von ihnen jedoch wesentlich dadurch, daß die Objectivlinse stark gekrümmt ist und folglich eine kleine Oeffnung hat. Der zu betrachtende kleine Gegenstand wird dicht hinter ihren Brennpunkt gebracht, so daß nach dem dritten Linsengesetze (pag. 335) von ihm ein objectives, umgekehrtes und vergrößertes Bild entsteht. Dieses wird wie beim Fernrohre durch eine auch hier als Lupe wirkende Ocularlinse nochmals subjectiv vergrößert und in die deutliche Sehweite gerückt.

Die Vergrößerung des zusammengesetzten Mikroskopes ist gleich dem Produkte der durch das Objectiv und Ocular einzeln hervorgebrachten Vergrößerungen. Vergrößert das erstere 20 mal, das letztere 5 mal, so ist die Gesammtvergrößerung 100malig. Wie dieselbe von der Brennweite der das Mikroskop zusammensetzenden Linsen und von der Sehweite abhängt, ergibt sich leicht aus den auf pag. 343 enthaltenen Formeln. Nach denselben ist, wenn man dieselbe Bezeichnung wie dort anwendet, die durch das Objectiv hervorgebrachte lineare Vergrößerung

$$\frac{H}{h} = \frac{b}{a} = \frac{b}{p} - 1$$

Ebenso ist, wenn man die Höhe des vom Ocular erzeugten subjectiven Bildes durch K, die Brennweite desselben durch f, die a und b entsprechenden Entfernungen durch a' und b' bezeichnet

$$\frac{K}{H} = \frac{b'}{a'} = \frac{s}{f} + 1$$

mithin die Gesammtvergrößerung

$$\frac{K}{h} = \frac{b}{a} \times \frac{b'}{a'} = \left(\frac{b}{p} - 1\right)\left(\frac{s}{f} + 1\right).$$

Man erkennt hieraus sofort, daß die Vergrößerung um so stärker ist, je kürzer die Brennweite jeder der beiden Linsen und je größer die Sehweite ist. Angenähert kann man statt der obigen Gleichung auch setzen

$$\frac{K}{h} = \frac{b}{a} \times \frac{s}{f}.$$

Ist also beispielsweise die Entfernung des zu betrachtenden Gegenstandes von der Objectivlinse $a = {}^{10}/_9\, p$, so ist $b = 10\, p$, folglich $\frac{b}{p} = 10$. Ist ferner $s = 20\, f$, so wird die Vergrößerung $10 \times 20 = 200$ betragen. Gewöhnlich bestimmt man dieselbe übrigens ähnlich wie beim Fernrohr durch den Versuch. Man legt zu diesem Zwecke unter das Objectiv einen fein getheilten gläsernen Maßstab, sog. Mikrometer, bringt über das Ocular eine camera lucida oder einen kleinen unter 45^0 gegen die Axe des Mikroskopes geneigten Spiegel und dahinter einen gewöhnlichen Maßstab in verticaler Stellung. Sieht man nun seitwärts in die camera lucida, so erblickt man das vergrößerte Bild der Mikrometertheilung zugleich mit der Theilung des Maßstabes, kann also beide direct mit einander vergleichen.

Je stärker die Vergrößerung eines Mikroskopes ist, desto heller muß das Object, welches betrachtet werden soll, beleuchtet werden, desto genauer muß es eingestellt werden können. Es sind deshalb bei allen stärker vergrößernden Mikroskopen besondere Vorrichtungen zur Beleuchtung und ein besonderer Objecttisch vorhanden, welche beide mit dem festen Gestelle (Stativ) verbunden sind, von welchem das Mikroskop selbst getragen wird. Dieses ist nothwendig, weil jede Erschütterung in dem Mikroskope ebenfalls vergrößert erscheint. Der Objecttisch besteht aus einer massiven Messingplatte, welche in der Mitte, gerade unter dem Objectivglase, durchbohrt ist, und demselben durch Schrauben genähert werden oder von ihm entfernt werden kann. Dadurch ist es möglich, bei unveränderter Entfernung der Ocular- und Objectivlinse dem Bilde die größte Schärfe zu geben. Das mikroskopische Object, welches gewöhnlich zwischen Glasplatten eingeschlossen ist, wird über die Mitte der Durchbohrung auf den Objecttisch gelegt und theils durch einen unterhalb desselben befindlichen drehbaren Hohlspiegel, von dem man das Wolkenlicht reflectiren läßt, theils von oben her durch eine schräg gestellte Sammellinse beleuchtet.

Es sei noch erwähnt, daß zwischen der Ocular- und Objectivlinse gewöhnlich noch eine dritte Sammellinse, die Collectiv-

linse eingeschaltet ist, durch welche die durch das Objectiv gegangenen Strahlen aufgefangen werden, noch ehe sie sich zu einem Bilde vereinigen. Durch dieselbe erzielt man nicht nur schärfere Bilder sondern vergrößert auch noch etwas das Gesichtsfeld. Ebenso ist auch das Objectiv aus einem achromatischen Linsensystem zusammengesetzt. Selbstverständlich sind alle Linsen durch eine Röhre verbunden, die wie beim Fernrohr innen geschwärzt und an passenden Stellen mit Blendungen versehen ist, aber, wie schon angedeutet, keinen Auszug hat. Die stärkste bisher erreichte (lineare) Vergrößerung beträgt etwa 5000. Sie kann aber nur bei sogenannten Immersionsmikroskopen so weit getrieben werden, bei denen man eine größere Lichtstärke dadurch erzielt, daß man das Objectiv in Wasser, Mohnöl oder eine ähnliche Flüssigkeit taucht, welche nahezu dasselbe Brechungsverhältniß wie Glas besitzt. Neben der Stärke der Vergrößerung und der genügenden Helligkeit sind besonders die Schärfe der Umrisse in den Bildern und die Größe des Gesichtsfeldes für die Güte eines Mikroskopes maßgebend. Man prüft sie durch Probeobjecte, als da sind: Schmetterlingsschuppen (von Bombyx mori, Hyppardria Janira fem. 2c.) oder besser durch sehr fein getheilte Glasmikrometer.

19. Regenbogen. — Das Aeußere der Erscheinung anbelangend sei zunächst daran erinnert, daß der Regenbogen stets der Sonne gegenüberliegt und zwar um so tiefer, je höher die Sonne steht; daß die Reihenfolge der Farben in ihm dieselbe, wie in dem prismatischen Spectrum ist und zwar so, daß das Violett unten liegt. Der Mittelpunkt des Kreises, von welchem der Regenbogen ein Theil ist, liegt stets in der geraden Linie, welche man sich von der Sonne durch das Auge des Beobachters denkt. Eine zweite Gerade, vom Auge nach irgend einem Punkte des Regenbogens selbst gezogen, bildet mit der ersten nach dem Mittelpunkte gezogenen einen unveränderlichen Winkel von etwa 42° woraus folgt, daß der Regenbogen um so größer sein muß, je tiefer die Sonne steht, sein Gipfel indessen nur 42° über dem Horizonte stehen kann, daß er unter letzteren herabsinken muß, wenn die Sonnenhöhe auf mehr als 42° wächst.

Zur Erklärung denke man sich statt des Wassertropfens zunächst ein Prisma, dessen brechende Kante nach oben gerichtet ist und dahinter einen stark gekrümmten Hohlspiegel, durch welchen die aus dem Prisma hervortretenden farbigen Strahlen in das Auge reflectirt werden. Bei hinreichend starker Farbenzerstreuung würde nur eine Gattung von Strahlen z. B. die rothen in die Pupille gelangen und man müßte, um zugleich die violetten zu erblicken, unter dem ersten Prisma noch ein zweites aufstellen. In Wirklichkeit werden nun die Sonnenstrahlen bei ihrem Eintritte in den oberen Theil eines Regentropfens zerlegt, an der Hinterwand desselben reflectirt und treten nach nochmaliger Brechung aus demselben hervor, die violetten höher als die rothen. Wenn diese in das Auge eintreten, werden jene demnach darüber fortgehen und es können daher nur tiefer gelegene Tropfen sein, die dem Auge violettes Licht zusenden. Deshalb erscheint der violette Theil des Regenbogens tiefer als der rothe. Uebrigens ist der größte Theil der aus den Tropfen hervortretenden Strahlen stark zerstreut, und nur ein geringer Theil hinreichend dicht, um in dem Auge einen merklichen Eindruck hervorbringen. Diese wirksamen Strahlen, welche also allein den Tropfen sichtbar machen, bilden mit der Richtung der auffallenden Strahlen einen gewissen Winkel, dessen Größe durch das Brechungsverhältniß des Wassers gegen Luft bestimmt ist. Derselbe beträgt für die rothen Strahlen $42^0\ 2'$, für die violetten dagegen $40^0\ 16'$. Denselben Winkel müssen die in unser Auge gelangenden Strahlen mit einer durch das letztere von einem Punkte der Sonne gezogenen Linie bilden, weil diese, wegen der großen Entferung der Sonne als parallel zu den Strahlen anzusehen ist, welche auf den Regentropfen fallen. Deshalb muß uns also der Halbmesser des Regenbogen-Kreises unter einem Sehwinkel, der für den rothen Theil $42^0\ 2'$, für den violetten $40^0\ 16'$ beträgt, erscheinen. Die Breite des von einem Punkte der Sonnenscheibe erzeugten Farbenbogens würde sich hiernach zu $42^0\ 2' - 40^0\ 16' = 1^0\ 46'$ ergeben. Denkt man sich den betreffenden Punkt um $31'$ — den scheinbaren Durchmesser der Sonne — gehoben oder gesenkt, so wird der Regenbogen

sich um ebenso viel in entgegengesetzter Richtung bewegen. Hieraus geht hervor, daß seine wirkliche Breite $1^0 46' + 31' = 2^0 17'$ betragen muß, was mit der Erfahrung übereinstimmt.

Außer dem eigentlichen Regenbogen sieht man gewöhnlich noch einen lichtschwächeren von größerem Durchmesser, der Nebenregenbogen. Er steht von dem Hauptbogen um etwa 9^0 ab, hat eine Breite von $3^0 43'$ und zeigt die umgekehrte Reihenfolge der Farben. Er entsteht durch Strahlen, welche, nachdem sie in einem mehr nach unten gelegenen Punkte in den Tropfen eintreten und zweimal an der inneren Wandung reflectirt sind, im oberen Theile wieder hervortreten, jedoch zugleich nach der Erdoberfläche gebrochen werden. Die umgekehrte Reihenfolge der Farben erklärt sich dadurch, daß die violetten Strahlen desselben Tropfens im vorliegenden Falle Falle unterhalb des Auges fortgehen, wenn letzteres von den zugehörigen rothen Strahlen getroffen wird.

20. Natürliche Farben der Körper. Absorption, Fluorescenz, Phosphorescenz. — Wir haben §. 13 gesehen, daß wenn man das durch ein Prisma zerlegte Sonnenlicht auf einem Schirm von weißem Papier auffängt, der letztere an den verschiedenen Stellen des Spectrums in der betreffenden Farbe erscheint. Das weiße Papier muß also die Fähigkeit besitzen, Strahlen aller Gattungen in unser Auge zu reflectiren. Fängt man das Spectrum mittels eines Schirmes von farbigem, aber nicht glänzendem, Papier auf, so erblickt man gewöhnlich auf demselben zwar auch alle Farben, aber vorwiegend diejenige, in welcher der Körper für gewöhnlich im weißen Lichte erscheint, also auf rothem Papier z. B. erscheint der rothe Theil des Spectrums besonders stark, die blauen Theile dagegen sehr schwach, und analoges zeigt sich bei anders gefärbten Schirmen. Einen ähnlichen Anblick hat man wenn man einen schmalen Streifen des betreffenden farbigen Stoffes vor einem schwarzen Hintergrund, am besten Sammet, durch ein Prisma betrachtet. Nur weiße Körper zeigen in diesem Falle ein vollständiges Spectrum; bei farbigen Stoffen sieht man einige Theile desselben mehr oder weniger geschwächt oder ganz ausgelöscht, so daß stets nur

derjenige Theil bleibt, welcher der für gewöhnlich mit bloßem Auge wahrgenommenen Farbe des Körpers entspricht. Hieraus folgt, daß die Farben, welche die Körper im auffallenden Lichte zeigen, nicht eine natürliche Eigenschaft der Körper sind, sondern nur dadurch entstehen, daß viele Körper nicht wie die weißen die Fähigkeit besitzen, alle Strahlengattungen gleich vollkommen zu reflectiren, sondern vorwiegend nur einzelne derselben. Welche diese sind erkennt man auf die oben angegebene Art durch das Prisma. Das Licht aller Farbstoffe oder Pigmente erweist sich bei dieser Prüfung als zusammengesetzt, auch wenn es dem bloßen Auge einfach erscheint. Deshalb ergeben Mischungen von Farbstoffen auch ganz andere Resultate, als solche von einfachen Farbengattungen, wie man sie durch Zerlegung des weißen Lichtes mittels der Prismas erhält. Sehr deutlich zeigt dieses der bekannte Versuch mit dem Farbenkreisel. Derselbe besteht bekanntlich darin, daß man verschiedene Sectionen einer Kreisscheibe, deren Breite etwa in demselben Verhältnisse steht, wie die der Hauptfarben des Spectrums, mit den entsprechenden Pigmenten bemalt und in schnelle Drehung versetzt. Man erhält dann statt des Weiß ein unbestimmtes Grau. Noch auffallender ist der Unterschied bei der Mischung nur zweier Pigmente z. B. eines blauen und gelben. Man erhält dann bekanntlich Grün, während reines Blau und gelbes Licht nach Helmholtz Weiß geben. Die oben angeführte Verschiedenheit erklärt sich nun leicht daraus, daß jeder der in unserm Beispiele angenommenen Farbstoffe außer seiner Hauptfarbe auch noch Grün reflectirt, welches übrig bleibt, während die andern Bestandtheile des reflectirten Lichtes sich zu Weiß ergänzen.

Wenn ein Körper von Strahlen getroffen wird, welche er nicht zu reflectiren vermag, so erscheint seine gewöhnliche Farbe gänzlich verändert. Wir erinnern an die frappante Wirkung einer Kochsalz- (resp. Natrium-) Flamme, (vergl. pag. 333) von welcher beleuchtet farbige Gegenstände in einem sonst dunkeln Zimmer fast schwarz, die Gesichtsfarbe leichenähnlich erscheinen.

Aehnlich erklärt sich auch die pag. 298 angeführte Wirkung des bläulichen Spiegelglases. Im Dunkeln existirt keine Farbe, ist also auch z. B. eine Rose nicht roth.

Betrachtet man das prismatische Spectrum durch ein gefärbtes Glas, so verschwinden ebenfalls einzelne Theile desselben; bei Anwendung eines rothen Glases z. B. fällt das Violett und Blau fast ganz fort. Hieraus ergibt sich sofort, daß die verschiedenen Farben, welche die Körper im durchgehenden Lichte zeigen, dadurch entstehen, daß nur gewisse Strahlengattungen von ihnen hindurchgelassen, die andern dagegen absorbirt (verschluckt) werden. Die Absorption hat, wie wir pag. 325 gesehen haben, darin ihren Grund, daß die lebendige Kraft der betreffenden Aetherschwingungen auf die Körperatome übertragen wird.

Häufig zeigen Körper im durchgehenden Lichte eine andere Farbe, als im auffallenden, wie z. B. die trüben, milchigen Stoffe, (Milchglas, Wasserdampf, Rauch &c.) welche meistens im auffallenden Lichte weiß oder grau, im durchgehenden roth erscheinen. So sieht man häufig die Sonne durch Rauch, oder das Licht der Signallaternen an der Locomotive im ausströmenden Dampfe roth gefärbt. Aehnlich erklärt sich die Abend- und Morgenröthe. Goethe wollte auf derartige Phänomene seine Farbenlehre gründen, doch ist dieselbe als widerlegt anzusehen.

21. Einen eigenthümlichen Farbenwechsel zeigen die sogenannten fluorescirenden Substanzen, wie z. B. Petroleum oder Flußspat, indem sie im durchgehenden Lichte wasserhell oder wenigstens durchsichtig erscheinen, im auffallenden dagegen einen lebhaften Farbenschimmer zeigen, der beim Petroleum bekanntlich blau, beim Flußspat violett ist, während der letztere im durchgehenden Lichte eine hell weingelbe Farbe hat. Fast alle Pflanzenstoffe zeigen die Fluorescenz, namentlich das Blattgrün (Chlorophyll) und besonders einige in den Rinden enthaltenen Stoffe, wie das Chinin der Fieberrinde, das Aesculin in derjenigen der Roßkastanie. Diese Substanzen fluoresciren ähnlich wie das Petroleum im blauen Lichte. Auch manche Sorten Bernstein sind fluorescirend.

Nicht jedes Licht vermag die Fluorescenz hervorzurufen. Gewöhnliches Kerzen- oder Gaslicht wirkt z. B. fast gar nicht erregend, dagegen außer dem Sonnenlichte das electrische Licht, so wie das des brennenden Magnesiums sehr kräftig. Will man untersuchen, welche Strahlen bei der Erzeugung der Fluorescenz besonders wirksam sind, so muß man das erregende Licht durch ein Prisma zerlegen, und indem man die verschiedenen Theile des Spectrums durch einen Spalt gehen läßt, sie einzeln untersuchen. Am besten fängt man dabei das Strahlenbündel durch eine Sammellinse auf, so daß der durch Brechung in derselben erzeugte Strahlenkegel in die fluorescirende Substanz eintritt. Durch derartige Versuche hat man gefunden, daß es häufig die unsichtbaren übervioletten Strahlen sind, welche blaues Fluorescenzlicht hervorrufen. Wie in diesem Falle hat meistens das Fluorescenzlicht eine geringere Brechbarkeit als dasjenige, durch welches es hervorgerufen wurde. Nach Stokes soll dieses stets der Fall sein, doch machen einige Substanzen z. B. das Magdalaroth (eine Anilinfarbe) von diesem Gesetze eine bemerkenswerthe Ausnahme. Der letztgenannte Stoff fluorescirt in orangegelbem Lichte, auch wenn er von rothem Lichte getroffen wird. Das Fluorescenzlicht enthält also stärker brechbare Strahlen als das erregende. Dabei ist es, mit Rücksicht auf das oben über die Absorption Gesagte wichtig, daß das Fluorescenzlicht mit dem Prisma untersucht, denselben Theil des Spectrums zeigt, in welchem auch die Absorption am stärksten ist.

Bestreicht man die eine Hälfte eines Papierstreifens der Länge nach mit einer stark fluorescirenden Substanz, z. B. Chininlösung, und entwirft auf demselben ein prismatisches Spectrum, so erscheint dasselbe in dem bestrichenen Theile bedeutend länger, indem zu dem ersten gewissermaßen noch ein zweites Spectrum, das Fluorescenzspectrum hinzutritt. Letzteres kann man durch ein zweites Prisma getrennt erblicken. Es enthält gewöhnlich alle Faben, wenngleich schwächer. Nach Eisenlohr's Vermuthung entsteht das Fluorescenzlicht ähnlich wie die Differenztöne aus der Combination verschieden schnellschwingender Licht-

strahlen zu solchen von langsameren Schwingungen; doch müßte man dann nach pag. 269 ungewöhnlich starke Schwingungen bei den ursprünglichen Strahlen voraussetzen, was doch nicht in allen Fällen zutreffend sein dürfte. Nach Lommel ist die Erscheinung der Fluorescenz der des Mittönens (Lehre vom Schall §. 12. 13) analog, und zwar nimmt er an, daß wenn ein Molecül durch die Strahlen, welche die Fluorescenz erregen, in schwingende Bewegung versetzt wird, es nicht nur mit der Schwingungsperiode der erregenden (folglich, nach dem Vorigen, absorbirten,) Strahlen schwingt, sondern auch zugleich sämmtliche ihm eigenthümliche Schwingungsperioden mitklingen, wie in ähnlicher Weise z. B. bei Erregung der Stimmgabeln und Klangscheiben gewöhnlich eine größere Zahl unharmonischer Obertöne mitklingt. Wenngleich durch diese Annahme viele Erscheinungen erklärt werden, wie u. A. die Fluorescenz des Magdalarothes, so bleibt es doch unverständlich, weshalb man dann nicht bei Zerlegung des Fluorescenzlichts statt eines vollständigen Spectrum's nur einzelne helle Linien sieht.

Mit der Fluorescenz dem Wesen nach identisch und von ihr nur durch die längere Dauer verschieden ist die Phosphorescenz, die wir bereits pag. 288 erwähnt haben. Die Erscheinung, welche wir hier meinen, hat mit dem Leuchten des Phosphors nichts weiter gemein als den Namen, denn das Letztere beruht nach pag. 288 auf einer langsamen Verbrennung, während die eigentliche Phosphorescenz, wie es scheint, als ein Nachschwingen der in Vibration versetzten Molecüle, entsprechend dem Nachklingen eines einmal zum Tönen gebrachten elastischen Körpers anzusehen ist. Becquerel hat gefunden, daß manche Substanzen schon nachleuchten, wenn sie nur den zehntausendsten Theil einer Secunde dem Sonnenlichte ausgesetzt werden. Die Farbe des Phosphorescenzlichtes ist eben so wie die der Fluorescenz unabhängig von dem erregenden Lichte, vielmehr nur durch die Natur des nachleuchtenden Stoffes bedingt, die Stärke der Phosphorescenz dagegen hängt von der Art der erregenden Strahlen ab, und zeigt sich z. B. beim Schwefelzink eine besonders starke Wirkung durch das violette Licht. Manche Stoffe, wie Kiesel und Quarz werden durch Reiben phosphorescirend und verbreiten dabei

einen eigenthümlichen Geruch; hierbei mag die Electrizität eine Rolle spielen, durch welche in manchen Fällen ebenfalls die Phosphorescenz erregt werden kann. Durch Hitze kann dieselbe zerstört werden.

22. Subjective Farben. — Damit eine Farbe von uns wahrgenommen wird, ist es nicht nur erforderlich, daß unser Auge von entsprechend schnellen Aetherschwingungen getroffen wird, diese müssen sich auch durch die Medien unseres Auges bis zur Netzhaut fortpflanzen und dieselbe zu erregen im Stande sein. Man muß deßhalb die objectiv vorhandenen Farbenstrahlen von der subjectiven Farbenempfindung unterscheiden. Wie wir pag. 346 gesehen haben, werden nicht von allen Augen die Farben auf gleiche Weise wahrgenommen, es fehlt vielmehr manchem Auge die Fähigkeit, gewisse Farbentöne zu empfinden. Nach der Young'schen Hypothese beruht dieser Mangel auf der Unempfindlichkeit gewisser Nervenfasern. Setzt man die Richtigkeit dieser Ansicht voraus, so muß es, wie früher auch schon angedeutet wurde, möglich sein, die Farbenempfindung zu verändern, wenn man einen Theil der Nerven zeitweise unempfindlich macht; dieses wird durch die Erfahrung bestätigt. Hat man eine Zeit lang auf eine gewisse Farbe z. B. auf lebhaft roth gefärbtes Papier gesehen und blickt dann auf eine weise Fläche, so erscheint dieselbe grünlich. Im allgemeinen erblickt man bei ähnlichen Versuchen die complementäre Farbe der zuerst gesehenen. Man versteht darunter eine solche Farbe, welche mit der ersteren vereinigt Weiß geben würde. Man erhält stets zwei complementäre Farben, wenn man sich das Spectrum in zwei beliebige Abtheilungen theilt und die zu jeder derselben gehörigen Strahlen zu einer Mischfarbe vereinigt. Das Auftreten der complementären Farbe des Roth in dem obigen Beispiele erklärt sich nun leicht aus der zeitweisen Ermüdung der rothempfindenden Nerven. Von weißem Papier werden, wie wir wissen, sämmtliche Farben reflectirt, aber wegen der Ermüdung der rothempfindenden Nervenfasern werden nur die übrigen Farbentöne empfunden, welche vereinigt eine grünliche Mischfarbe geben. Blickt man statt auf Weiß, nachdem man einige Zeit rothes Licht

hat auf das Auge wirken lassen, auf grün, so macht dieses einen besonders lebhaften Eindruck, was sich nach dem Obigen leicht erklären läßt. Daher erscheint auch das Roth der Mohnblumen oder ähnlich gefärbter Stoffe gegen einen grünen Hintergrund, wie ihn eine Wiese oder die Blätter des Laubwaldes bieten, ungewöhnlich brennend.

Ueberhaupt heben sich zwei complementäre Farben gegenseitig, wenn man sie nebeneinander oder unmittelbar nacheinander betrachtet. Dies ist bei der Zusammenstellung von Mustern so wie bei der Auswahl farbiger Stoffe zu beachten.

23. Beugung und Interferenz des Lichtes und damit zusammenhängende Erscheinungen. — Die theoretische Grundlage für die im Folgenden zu besprechenden Erscheinungen, bei welchen die gegenseitige Einwirkung der Lichtwellen aufeinander eine Rolle spielt, ist in der Wellenlehre, namentlich in den §§. 10 und 11 gegeben.

Wir betrachten zunächst den einfachen Fall, wenn die Wellen von zwei Lichtpunkten ausgehen und dieselbe Länge haben. Um die dann eintretende Erscheinung durch das Experiment zu untersuchen, ließ Young einfarbiges (Sonnen-) Licht, wie man es am besten mit Hülfe eines Prismas nach der pag. 319 angegebenen Methode erhält, durch zwei sehr feine nahe neben einander liegende Oeffnungen A und B in ein dunkeles Zimmer fallen und fing dasselbe auf einem weißen Schirm auf. Auf letzterem zeigten sich dann abwechselnd helle und dunkele Streifen, die verschwanden, wenn eine der Oeffnungen verdeckt wurde. Dunkelheit wird da eintreten, wo die von A und B ausgehenden Lichtwellen sich gegenseitig vernichten. Nach §. 10 der Wellenlehre wird dieß aber an solchen Stellen geschehen, für welche der Unterschied der Entfernungen von A und B eine ungerade Zahl von halben Wellenlängen beträgt, während diejenigen Stellen hell erscheinen müssen, für welche jene Entfernungen um eine oder mehrere ganze Wellenlängen von einander verschieden sind. Hieraus geht hervor, daß die Abstände der aufeinander folgenden dunkeln und hellen Stellen von der Wellenlänge des angewandten Lichtes abhängig sein müssen, und

in der That nehmen sie mit der Wellenlänge zu, indem sie bei violetten Lichte am kleinsten, bei rothem am größten sind. Demnach wird man auch die Wellenlänge für die einzelnen Farben durch Messung jener Abstände bestimmen können, wenn außerdem die Entfernung der beiden Lichtpunkte A und B von einander und vom Schirm bekannt ist. Derartige Bestimmungen sind in der That vielfach ausgeführt. Ist die Wellenlänge (l) ermittelt, so kann man mit Hülfe der bekannten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes*) (c) nach der Gleichung (a) pag. 183 die Anzahl der Vibrationen in jeder Secunde (n) leicht berechnen. Es ist nämlich

$$n = \frac{c}{l}$$

Das Resultat derartiger Berechnungen ist für die Stellen des Spectrums, welche den Fraunhofer'schen Linien erster Ordnung entsprechen, in folgender Tabelle enthalten:

Fraunhofer'sche Linie.	Wellenlänge (l) in Millimetern.	Schwingungszahl (n).
B roth.	0,00069	450 Billionen.
C roth.	0,00066	472 „
D goldgelb.	0,00059	562 „
E grün.	0,00053	589 „
F blaugrün.	0,00048	640 „
G violett.	0,00043	722 „
H violett.	0,00039	790 „

Da die Breite und die Lage der hellen wie der dunkeln Interferenz-Streifen für die einzelnen Farben verschieden ist, so folgt, daß man bei Anwendung von weißem Lichte in den obigen Versuchen eine Reihe von farbigen Streifen erhalten muß. Die so erhaltenen Interferenzspectra werden sehr schön, wenn man statt zweier Oeffnungen viele gleiche in gleichen gegenseitigen

* Vergleiche weiter unten.

Abständen anwendet, sogenannte Gitter. Am besten beobachtet man derartige Erscheinungen wenn man die Oeffnungen in einem feinen Metallblätchen anbringt, dasselbe vor das Auge hält und nach einem hellen Lichtpunkte z. B. einer von der Sonne beschienenen Thermometerkugel oder abends nach einer entfernten Gasflamme hinsieht. Auch ohne Anwendung einer besonderen Vorrichtung kann man sich den Anblick eines Interferenzspectrums verschaffen, wenn man die Augen fast schließt uud auf einen Lichtpunkt hinsieht. Hier wird das Gitter durch die Augenwimpern gebildet. Auch die Fasern einer Federfahne, die Fäden eines feinen Gewebes ꝛc. liefern passende Gitter zur Erzeugung von Interferenzspectren.

Selbst vermittelst einer Oeffnung kann man Interferenzstreifen hervorbringen. Nach pag. 193 werden nämlich die in der Oeffnung liegenden Aethertheilchen durch die auffallende Welle erschüttert, sodaß sie als Mittelpunkte neuer Wellensysteme zu betrachten sind, welche folglich miteinander interferiren können. Bezeichnen wir, um dieses noch genauer auszuführen, einen Querdurchmesser der Oeffnung durch $A\,B$, die Mitte desselben durch M, und nehmen wir an, daß der Schirm, auf welchem die durch $A\,B$ hindurchgegangenen Strahlen aufgefangen werden, zu $A\,B$ parallel sei. Denken wir uns von M auf die Ebene des Schirmes ein Loth gefällt, welches diesen in C trifft, so ist ersichtlich, daß in diesem Punkte Helligkeit herrschen muß, weil ebenso wie A und B alle anderen, symmetrisch zu M liegenden Punkte der Oeffnung gleich weit von C entfernt sind. Seitwärts von C sowohl auf der rechten als auf der linken Seite wird es aber zwei Punkte D und D' geben, deren Entfernungen von A und B um eine ganze Wellenlänge (l), von A und M also um eine halbe Wellenlänge verschieden sind. Bezeichnen wir nun die Reihe der Aethertheilchen zwischen A und M durch A', A'' ꝛc., ebenso die zwischen M und B gelegenen Theilchen durch M', M'' ꝛc., so ist leicht ersichtlich, daß ebenso wie die Differenz $MD - AD = \frac{l}{2}$ ist, auch $M'D - A'D$, $M''D - M'D$ ꝛc. diesen Werth haben; demnach müssen sich die von

den Punkten A, A', A'' ꝛc. ausgehenden Wellen mit den von den Punkten M, M', M'' ꝛc. ausgehenden bei ihrem Zusammentreffen in D vernichten; hier wird also Dunkelheit herrschen. Dasselbe gilt für D'. Etwas weiter seitlich von C werden zwei Punkte E und E' vorhanden sein, deren Entfernungen von A und B um $3\frac{l}{2}$ verschieden sind. Denkt man sich, um die Wirkung der von der Oeffnung ausgehenden Wellen für diese Punkte zu ermitteln, die Gerade A und B in drei gleiche Theile getheilt, so ist, wie oben, ersichtlich, daß sich die Wirkung der Aethertheilchen des ersten Drittels mit derjenigen des zweiten Drittels aufhebt, also nur die vom letzten Drittel ausgehende übrig bleibt; in E und E' wird also wiederum eine größere Lichtstärke herrschen, wenn gleich dieselbe geringer als in C ist. Hiernach erkennt man sofort, daß in noch größerer Entfernung auf beiden Seiten von C helle und dunkele Streifen miteinander abwechseln werden, so jedoch, daß die Lichtintensität der hellen Stellen immer geringer wird, sodaß sie zuletzt verschwinden. Der Uebergang von hell zu dunkel ist hier wie in den vorhergehenden Fällen ein allmähliger, da in der Nähe der Punkte größter Dunkelheit sich die Wirkungen der von A und B ausgehenden Wellen, wenn auch nicht ganz, so doch theilweise vernichten werden. Wie bei zwei Oeffnungen treten auch hier statt heller und dunkler Streifen verschiedene Farben auf, wenn man statt des einfachen Lichtes weißes anwendet. Sehr verschiedenartige Spectra erhält man, wenn man die Form der Oeffnung, durch welche das Licht hindurch geht, verändert; so erblickt man bei kreisförmigen Oeffnungen ein System von concentrischen Farbenringen, bei dreiseitigen dagegen einen Stern, dessen Strahlen auf den Mitten der Seiten senkrecht stehen, und dergl. m.

Aehnliche Erscheinungen wie beim Durchgange des Lichts durch enge Oeffnungen müssen nach §. 11 der Wellenlehre eintreten, wenn man die von einem Lichtpunkte kommenden Strahlen bei einem schmalen Schirm, z. B. einer Nähnadel vorbeigehn läßt; hier interferiren die von den Rändern des letzteren ausgehende Elementar-Wellen miteinander.

Farben dünner Blättchen. — Zu den durch Interferenz entstehenden Farben gehören auch diejenigen, welche man bei durchsichtigen dünnen Häutchen, z. B. Seifenblasen, bemerkt. Setzt man eine solche auf eine feste Unterlage z. B. auf den Rand eines Trinkglases so bildet sich bald um den Gipfel eine Reihe von farbigen Ringen, deren Farben eine bestimmte Reihenfolge zeigen. Noch besser kann man diese Ringe erhalten, wenn man eine sehr schwach gekrümmte convexe Linse auf ein Spiegelglas legt und schräge darauf sieht; hier wirkt dann die dünne Luftschicht zwischen Linse und Glas. Newton, der diese Farben zuerst genauer untersuchte, unterschied bei ihnen gewisse Ordnungen, welche durch ziemlich scharf markirte, dunkle Ringe von einander geschieden werden. Es sind von der Mitte aus gerechnet folgende:

1. Ordnung: schwarz, blaßgrau, weiß, gelb, orange, roth,
2. „ violett, blau, gelblich, grün, gelbroth,
3. „ purpur, indigoblau, grün, gelb, rosa, carmoisin,
4. „ bläulichgrün, gelblich, roth, schwachroth,
5. „ schwachgrün, weiß, schwachroth.

Dieselbe Reihenfolge der Farben zeigt sich auch, wenn man Wasser oder einen andern durchsichtigen Stoff zwischen beide Glasflächen bringt, nur ändert sich dann die Breite der Ringe. Newton maß sehr genau die Durchmesser der einzelnen Ringe und bestimmte durch Rechnung die Dicke der Schicht an den betreffenden Stellen. Bezeichnet man durch a die Abstände eines Ringes von der Mitte, durch d die Dicke der Luftschicht an derselben Stelle, durch R den Krümmungsradius der Linse, so ist $a^2 = d\,(2\,R - d)$ oder angenähert, da d sehr klein ist und man d^2 folglich fortlassen kann $a^2 = 2\,Rd$, mithin

$$d = \frac{a^2}{2\,R}.$$

So fand er z. B. für das Gelb der ersten Ordnung die äußerst geringe Dicke von $\frac{1}{178000}$ eines englischen Zolles.

Im durchgehenden Lichte zeigen die Blättchen die complementären Farben von denen, welche im auffallenden Lichte er-

scheinen. Beleuchtet man das Blättchen mit homogenem (einfarbigem) Lichte, so verschwinden die Farben, und man sieht, wie nach den früher beschriebenen Versuchen zu erwarten steht, nur helle und dunkle Ringe, jedoch in viel größerer Zahl als vorhin farbige. Diese Thatsache deutet schon darauf hin, daß hier eine Interferenz-Erscheinung vorliegt; es interferiren aber die von der oberen Grenzfläche des Blättchens reflectirten Strahlen mit den in dieselben eingedrungenen und an der zweiten Grenzfläche reflectirten, welche, nachdem sie zweimal die Dicke des Blättchens durchlaufen haben, wiederum zur ersten Grenzfläche austreten. Hiernach erklären sich also die Farben, welche erscheinen, wenn sich ein Tropfen Oel oder dergl. auf Wasser ausbreitet, ferner die Farben der Fischschuppen, der Insectenflügel, diejenigen, welche sich auf alten Fensterscheiben zeigen, auf deren Oberfläche sich eine Oxydschicht gebildet hat; ebenso die Farben des angelassenen Stahls, die Nobili'schen Farbenringe, welche hervorgerufen werden, indem man auf eine blanke Metallplatte durch den galvanischen Strom aus einer Salzlösung (z. B. Bleizucker) ein Metalloxyd niederschlägt. Nach der auf mathematische Untersuchungen gegründeten Vermuthung von Clausius entsteht auch das Blau des Himmels durch Reflection und Interferenz des Lichtes in den zarten Hüllen der in der Luft schwebenden Dunstbläschen, die auf diese Weise die allgemeine Tageshelle überhaupt hervorrufen. Da im durchgehenden Lichte sich die complementären Farben zu den verschiedenen Abstufungen des Himmelblau zeigen müssen, so würde sich dadurch auch die orange oder rothe Farbe erklären, wie wir sie in der Abend- und Morgenröthe wahrnehmen.

Wir haben nun noch schließlich die Höfe um Sonne und Mond zu erwähnen, deren Entstehen ebenfalls auf der Interferenz beruht. Man erkennt dieses sofort, wenn man die Erscheinung im Kleinen nachahmt, indem man z. B. eine Lichtflamme durch ein angehauchtes Glas betrachtet; so wie die Farbenringe, welche sich dann zeigen, durch Beugung an den Rändern der feinen Wassertröpfchen, entstehen die natürlichen Höfe durch Beugung an den Rändern der Nebelbläschen. Dieses gilt

jedoch nicht für die Nebensonnen und Nebenmonde, welche durch Brechung und Reflection des Lichtes in kleinen Eisnadeln (sechsseitige Prismen) hervorgerufen werden, die wegen ihrer Leichtigkeit wie Stäubchen in der Luft schweben, wie von Luftschiffern mehrfach constatirt ist.

24. **Polarisation und doppelte Brechung des Lichtes.** Die in diesem Paragraph zu besprechenden Erscheinungen sind es besonders, welche zur Folgerung geführt haben, daß, wenn das Licht in einer Wellenbewegung des Aethers besteht, diese eine transversale sein muß, wie sie die Theilchen eines Seiles machen (vergleiche pag. 182, 183 und 287). Denken wir uns ein Seil in andauernde Schwingungen versetzt und, während es schwingt, zwischen zwei parallele Ebenen gebracht, so werden, wenn man von der etwa stattfindenden Hemmung der Bewegung durch Reibung absieht, die Theilchen des Seiles nur noch solche Schwingungen ausführen können, welche zur Richtung der beiden Ebenen parallel sind, indem die darauf senkrechte Componente der Bewegung jedes Theilchens zerstört wird. Hält man also die Ebenen vertical, so werden alle Theilchen nur in einer verticalen Ebene schwingen können, hält man sie wagerecht, so wird die Bewegung der Theilchen nur in dieser Richtung stattfinden können. Hätte man dagegen allen Theilchen des Seiles von Anfang an eine verticale Schwingungsrichtung mitgetheilt und brächte sie nun zwischen z. B. horizontale Ebenen, so würde ihre Bewegung gänzlich vernichtet werden.

Ein ähnlicher Vorgang findet beim Durchgang von gewöhnlichem Lichte durch Krystalle statt, welche eine derartige Schichtung der Molecüle besitzen, daß die Bewegung der Aethertheilchen eines Strahles nach dem Durchgange durch den betreffenden Krystall nur noch in einer Ebene stattfindet. Der Lichtstrahl ist dann (nach pag. 287) geradlinig polarisirt. Besonders auffallend zeigt sich dieses beim Turmalin. Wenn man zwei aus einem Turmalinkrystall parallel zu seiner Hauptaxe geschnittene Plättchen über einander legt und das eine herumdreht, so zeigt sich, daß ein durch dieselben betrachteter Lichtpunkt bei jeder Drehung um 90° verschwindet und bei Fortsetzung der Drehung

wieder erscheint, so daß, wenn man eine vollständige Drehung ausgeführt hat, ein zweimaliger Wechsel der größten Helligkeit und Dunkelheit eingetreten ist. Diese Erscheinung erklärt sich einfach, wenn man annimmt, daß der Turmalin nur solche Strahlen hindurchläßt, deren Schwingungen parallel zu seiner Axe sind, dagegen weniger gut (oder vielmehr fast gar nicht) solche, die in einer zur Axe senkrechten Ebene stattfinden. Hiernach können also, wenn die Richtungen der Axe in beiden Plättchen sich kreuzen, die durch das erste hindurchgegangenen und polarisirten Strahlen nicht auch das zweite durchdringen, werden vielmehr ausgelöscht.

Aehnliche aber in mancher Hinsicht noch auffallendere Erscheinungen zeigt der isländische Kalk- oder Doppelspath. Die Krystalle desselben haben die Form eines Rhomboëders. Die Gestalt eines solchen kann man sich am leichtesten vermittelst eines Würfels versinnlichen; man fasse einen solchen zwischen Daumen und Zeigefinger an zwei solchen Ecken, die am weitesten von einander abstehn, und denke sich den Körper in der Richtung ihrer Verbindungslinie zusammengedrückt, jedoch so, daß drei Winkel an den berührten Ecken stets einander gleichbleiben; man erhält dann eine doppelt dreiseitige Pyramide an deren Spitzen je drei gleiche stumpfe Winkel zusammenstoßen. Die Verbindungslinie dieser beiden Spitzen ist die Hauptaxe des Rhomboeders. Nun hat der Kalkspath, wie der Turmalin, die Eigenschaft, daß er Schwingungen, welche in einer zu seiner Hauptaxe parallelen Richtung stattfinden, leichter durchläßt, als solche, deren Schwingungsrichtung auf der vorigen senkrecht steht; die letzteren pflanzen sich daher auch langsamer in dem Krystalle fort, d. h. (nach §. 9 dieses Abschnittes) sie werden anders gebrochen. Daraus folgt also, daß ein gewöhnlicher Lichtstrahl bei seinem Eintritt in den Kalkspath, wenn er nicht gerade die Richtung der Hauptaxe hat, in zwei Strahlen gespalten werden muß, welche den Krystall mit verschiedener Geschwindigkeit durchlaufen. Nur der eine dieser beiden Strahlen, für welchen sich verhält (vergl. pag. 310)

$$v : v' = 1 : 0,6045$$

folgt dem gewöhnlichen Bregungsgesetze, der andere, „extraordinaire" Strahl hat ein anderes Brechungsverhältniß.

Legt man ein Kalkspath-Rhomboeder auf ein Blatt Papier, auf welchem man einen Punkt mit Tinte angegeben hat, so erscheint derselbe von oben her betrachtet, stets doppelt und zwar haben beide Bilder gleiche Lichtstärke. Dreht man den Krystall um eine senkrechte Axe, so geht das von dem ungewöhnlichen Strahle herrührende Bild um das andere herum. Legt man auf das erste Kalkspath-Rhomboeder ein zweites, so wird jeder der beiden Strahlen nochmals zerlegt und man sieht daher jetzt vier Bilder; doch haben diese nicht mehr dieselbe Lichtstärke, ihre Helligkeit hängt vielmehr von der gegenseitigen Lage der beiden Rhomboeder ab und es gibt zwei Stellungen, in welchen zwei Bilder verschwinden. Da diese letztere Erscheinung der beim Turmalin beschriebenen durchaus analog ist, so folgt, daß die Lichtstrahlen beim Durchgange durch das Kalkspath-Rhomboeder in zwei polarisirte Lichtstrahlen zerlegt werden, deren Schwingungsebenen auf einander senkrecht stehen. Im allgemeinen läßt sich nicht nur jeder gewöhnliche Lichtstrahl in zwei rechtwinklig zu einander polarisirte Strahlen zerlegen, sondern man kann auch umgekehrt zwei derartige Strahlen zu einem gewöhnlichen Lichtstrahl zusammensetzen; dagegen interferiren zwei rechtwinklig polarisirte Lichtstrahlen nicht miteinander.

Ebenso wie Kalkspath zeigen die meisten Krystalle eine doppelte Brechung des Lichtes; nur diejenigen, welche zum regulären System gehören, wie der Diamant, machen davon eine Ausnahme. Allerdings tritt die doppelte Brechung bei keinem anderen Krystalle so auffällig hervor, wie beim Kalkspath.

Auch durch Reflection kann man geradlinig polarisirtes Licht erhalten. Läßt man auf eine Platte von Spiegelglas einen gewöhnlichen Lichtstrahl unter einem Winkel von 35° 25′ auffallen, so zerfällt er in zwei geradlinig polarisirte Strahlen, deren einer reflectirt wird, während der andere, in das Glas eindringende, auf dem reflectirten senkrecht steht. Die Schwingungsebenen beider stehen ebenfalls auf einander senkrecht. Fängt man den reflectirten Strahl durch einen zweiten Spiegel unter demselben

Winkel auf, und dreht den Spiegel um eine Axe, welche ebenso wie der zuerst reflectirte Strahl mit jedem Spiegel einen Winkel von 35⁰ 25′ bildet, so zeigt sich bei jeder Drehung um 90⁰ eine ähnliche Zu- resp. Abnahme der Intensität des vom zweiten Spiegel reflectirten Lichtes, wie wir sie oben beim Turmalin erwähnt haben. Dabei zeigt sich, daß jedesmal, wenn der zuerst aufgefallene und der zuletzt reflectirte Strahl in derselben, zu beiden Spiegeln senkrechten Ebene, liegen, die größte Helligkeit, wenn die Reflections-Ebenen beider sich durchkreuzen, die größte Dunkelheit herrscht. Statt des zweiten Spiegels, den man den Zerlegungsspiegel oder „Analyseur" nennt, wendet man gewöhnlich ein sogenanntes Nicol'sches Prisma an, welches aus zwei durch Canadabalsam aneinander gekitteten Kalkspathprismen besteht, die so geschliffen sind, daß der gewöhnliche Strahl an der gemeinschaftlichen Grenzfläche total reflectirt wird und nur der extraordinäre hindurchgeht. Man kann den Nicol auch durch einen Satz von dünnen Glasplättchen ersetzen, die man über einander schichtet und so in eine Röhre faßt, daß ein zur Axe derselben paralleler Strahl die Oberfläche der Plättchen unter dem oben angegebenen Winkel der vollkommensten Polarisation (35⁰ 25′) trifft. Bei andern Auffallswinkeln ist die Polarisation nicht vollständig, d. h. die Theilchen schwingen nicht ganz und gar in derselben Ebene.

Läßt man das von dem ersten Spiegel reflectirte Licht, bevor es zum Analyseur gelangt, durch ein dünnes Plättchen eines doppelt brechenden, im gewöhnlichen Lichte wasserhell erscheinenden Krystalls z. B. Gyps gehen, so zeigt sich dasselbe farbig, und zwar tritt bei jeder Drehung des Analyseurs um 90⁰ die complementäre Farbe der ursprünglichen auf. Diese Farbenbildung beruht ebenfalls auf Interferenz. Die beiden aus dem doppelt brechenden Plättchen hervorgehenden Strahlen können zwar, wenn sie rechtwinklig zu einander polarisirt sind, nach dem Obigen nicht interferiren, doch wird jeder derselben nochmals von dem Analyseur zerlegt und hier interferiren die gleichartig polarisirten Strahlen mit einander. Bei Anwendung von homogenem Lichte bemerkt man bei allen Interferenz-Erscheinungen statt des Far-

denwechsels nur einen Wechsel von Hell und Dunkel bei jeder Drehung um 90^0.

Durch manche Substanzen, wie Plättchen von Bergkrystall, welche senkrecht zu seiner Axe geschnitten sind, erleidet die Polarisationsebene eine Drehung, und zwar gibt es rechts- und linksdrehende Berg-Krystalle. Dieselbe Eigenthümlichkeit zeigen viele ätherische Oele, wie Terpentinöl, Citronenöl, Auflösungen von Gummi und Zucker 2c. Da die Größe der Drehung von der Concentration der Lösung abhängt, so hat man hierauf die Construction von Instrumenten gegründet, durch welche man auf die einfachste Weise den Gehalt z. B. von Zucker in einer Auflösung ermitteln kann; man nennt dieselben Saccharimeter. Sehr wichtig ist die von Faraday 1815 gemachte Entdeckung, daß auch der electrische Strom, ebenso wie kräftige Magnete die Polarisationsebene zu drehen vermögen.

Ebenso wie durch Glas wird auch durch die Reflection an beliebigen anderen Stoffen gewöhnliches Licht polarisirt und zwar am vollkommensten, wenn der reflectirte Strahl mit dem gebrochenen einen rechten Winkel bildet. Für diesen Fall ergibt sich aus dem Brechungsgesetze (pag. 310), da für den vorliegenden Fall $\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$ ist, die Gleichung $sin\, \psi = n\, sin \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)$ oder da $sin \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = cos\, \varphi$ ist auch $tang\, \varphi = n$.

Hiernach kann man den Winkel der vollkommensten Polarisation bestimmen, wenn das Brechungsverhältniß (n) bekannt ist; umgekehrt kann man auch dieselbe Gleichung zur Bestimmung von n benutzen, wenn φ bekannt ist. Man hat auf diesem Wege den Brechungsexponenten undurchsichtiger Körper, z. B. auch der Metalle zu bestimmen versucht. Je größer der Werth des Brechungsverhältnisses ist, desto unvollkommener polarisiren die Stoffe. Dies ist der Grund, weshalb Metallspiegel sich zu Polarisationsversuchen nicht eignen.

Wir haben bisher von geradlinig polarisirtem Lichte gesprochen; daß es auch kreisförmig und elliptisch polarisirtes Licht gibt, wurde schon pag. 287 erwähnt, doch gehört das Nähere darüber in fachwissenschaftliche Werke.

25. Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes. — Die Geschwindigkeit des Lichtes ist viel zu groß, als daß sie sich durch ähnliche Methoden, wie sie bei der Bestimmung der Schall-Geschwindigkeit zum Ziele führten und wie sie Galilei auch beim Lichte anzuwenden versuchte, ermitteln ließe. Die kosmischen Räume und die Geschwindigkeiten der Himmelskörper sind indessen Größen, welche sich mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichen lassen, und daher sind es zunächst astronomische Erscheinungen gewesen, welche zu ihrer Bestimmung führten. Wenn in neuerer Zeit (1848) die Ermittelung derselben dem französischen Physiker Fizeau auch bei irdischen Lichtquellen gelungen ist, so zeigt diese Thatsache auf das Schlagendste, wie außerordentlich sich seit der Zeit Galilei's die Beobachtungskunst vervollkommnet hat, um so mehr, als die Uebereinstimmung des nach Fizeau's Methode gefundenen Resultates mit dem durch astronomische Beobachtungen erlangten eine verhältnißmäßig sehr große ist.

Gewisse Unregelmäßigkeiten, welche sich bei der Verfinsterung der Jupitermonde zeigten, führten zuerst auf die Vermuthung, daß die Fortpflanzungszeit des Lichtes bei dieser und noch anderen Erscheinungen, die mit der Bewegung der Erde um die Sonne zusammenhängen, nicht zu vernachlässigen sei. Der Jupiter hat 4 Monde, deren Bahnen nahe mit seiner Aequatorebene zusammenfallen, und daher, mit Ausnahme des am weitesten entfernten, regelmäßig verfinstert werden. Es zeigte sich nun bei den durch Olaf Römer auf der Sternwarte zu Paris 1670—76 angestellten Beobachtungen, daß die Zwischenzeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verfinsterungen desselben Mondes geringer ist, wenn sich die Erde auf ihrer Bahn dem Jupiter nähert, als wenn sie sich von ihm entfernt, während annähernde Regelmäßigkeit sich zeigt, wenn Sonne und Jupiter mit der Erde in gerader Linie, also in Bezug auf sie in Opposition oder Conjunction stehen. (Ersteres findet dann statt, wenn Sonne und Jupiter auf entgegengesetzten Seiten von der Erde, letzteres wenn sie von dieser aus gesehen, auf derselben Seite stehen.) Olaf Römer erklärte sogleich die bemerkte Unregelmäßigkeit aus dem Umstande, daß das Licht eine merkliche Zeit gebrauche, um den von der

Erde zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verfinsterungen desselben Mondes beschriebenen Weg zu durchlaufen. Dieser Weg ist am größten zur Zeit der Quadraturen, wenn die von der Sonne nach der Erde und Jupiter gezogenen Linien rechte Winkel mit einander bilden. Die Beobachtung zur der Zeit Conjunction und Opposition ergab nun, daß die wahre Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verfinsterungen der nächsten Jupiter-Trabanten 42 Stunden 28 Minuten 36 Secunden betrage, zur Zeit der Quadraturen aber entweder 14 Secunden mehr oder weniger, je nach der Richtung der Bewegung der Erde. Da in dieser Zeit die Entfernung der Erde vom Jupiter sich um 590000 Meilen vermehrt, oder vermindert, so ergibt sich daraus der vom Lichte in einer Secunde zurückgelegte Weg zu 590000 : 14 = 42000 Meilen. Um möglichst genau den Werth der gesuchten Größe zu erhalten, wählte man als Punkte der Beobachtung diejenigen, an welchen die von der Fortpflanzungsdauer des Lichtes erzeugte Differenz zwischen Beobachtung und Rechnung ihren höchsten Werth erreichte, d. h. die Punkte der Opposition und Conjunction, in denen die Erde in Zwischenräumen von einem halben Jahre steht, deren Entfernung von einander also gleich dem Durchmesser der Erdbahn, oder 41364660 Meilen ist. Für diese Punkte betrug die Abweichung der Zeit im Eintritte resp. Ende der Verfinsterung 986,36 Secunden, oder nahezu 16 Minuten. So lange Zeit hatte das Licht also gebraucht, um den Halbmesser der Erdbahn zu durchlaufen. Der sich hieraus ergebende Werth der Lichtgeschwindigkeit (c) ist:

$$c = 41935 \text{ Meilen.}$$

Eine zweite mit der Bewegung der Erde zusammenhängende Erscheinung, welche ebenfalls zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit geführt hat, ist die sogenannte A b e r r a t i o n d e r F i x s t e r n e. Es ist dieses eine scheinbare Verschiebung der Sterne von dem Orte, an welchem man sie erblicken würde, wenn die Erde ruhte, die Bradley 1727 bemerkte, indem er den Ort eines Sternes während mehrerer Jahre in einem fest aufgestellten und mit Fadenkreuz versehenen Fernrohre beobachtete. Infolge der Aberration scheinen die Fixsterne sämmtlich im Laufe eines Jahres

kleine Ellipsen am Himmel zu beschreiben, deren große Axen sämmtlich dieselbe Größe haben, doch während die Länge der kleinen von der Stellung des Gestirnes gegen die Ebene der Ekliptik (d. h. der Erdbahn) abhängig ist. Die von einem im Pole der Ekliptik stehenden Stern beschriebene Ellipse hat nämlich dasselbe Axenverhältniß, wie die Ellipse, welche die Erde selbst durchläuft. Je näher der betreffende Stern der Ebene der Ekliptik liegt, desto kürzer ist die kleine Axe der scheinbar von ihm beschriebenen Ellipse, desto länglicher wird also ihre Gestalt, bis sie endlich in der Ebene der Ekliptik selbst sich in eine gerade Linie — ihre große Axe — zusammenzieht. Man kann also diese Ellipsen als verkleinerte, auf dem scheinbaren Himmelsgewölbe entworfene Abbildungen der Erdbahn ansehen.

Anmerkung. Um sich die so eben berührten Verhältnisse der Ellipse zu veranschaulichen, stecke man zwei Nadeln senkrecht in einer Entfernung von etwa 4^{cm} fest in ein mit einem Blatte Papier bespanntes Brett, schlinge einen Faden von 14^{cm} Länge, dessen Enden wieder mit einander verknüpft sind, um sie und einen Bleistift herum und fahre mit der Spitze des letzteren, immer den Faden gespannt haltend, auf dem Papier herum, dann beschreibt die Spitze eine in sich geschlossene krumme Linie, die Ellipse; die Punkte, in denen die Nadeln stehen, heißen die Brennpunkte. Die beiden Hauptdurchmesser, von denen der eine durch die beiden Brennpunkte geht, der andere ihn in der Mitte senkrecht durchschneidet, heißen die große und kleine Axe der Ellipse. Bekanntlich hat die Bahn der Erde um die Sonne die Form einer Ellipse, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht. Nimmt man an, daß die gezeichnete Ellipse die Erdbahn vorstelle, so würde ein im Mittelpunkte derselben auf ihrer Ebene, (also der Ebene der Ekliptik) errichtetes Loth, bis zum Himmelsgewölbe verlängert, den Pol der Ekliptik treffen. Denkt man sich eine nahezu kreisförmige Ellipse aus Papier geschnitten und einer Camera obscura gegenüber gestellt, so daß ihr Bild auf der matten Glastafel erscheint, so erhält man die Formen der oben erwähnten scheinbaren Fixsternbahnen, wenn man die Papierscheibe mehr und mehr gegen die optische Axe der Linse neigt und sie schließlich mit ihr zusammenfallen läßt; dann erscheint ihr Bild in der Camera offenbar als gerade Linie.

Die Aberration erklärt sich aus der Zusammensetzung der Geschwindigkeit der Erde mit derjenigen des Lichtes. Man gewinnt eine sehr deutliche Vorstellung einer derartigen zusammengesetzten Bewegung, wenn man z. B. aus dem Innern eines Eisenbahncoupe's, wenn es regnet, die Richtung der fallenden

Tropfen beobachtet. Fallen dieselben, während der Zug hält, senkrecht, also längs der Seitenkante des Fensters, so scheinen sie während der Fahrt sich in schräger Richtung in der Fensteröffnung zu bewegen, als ob sie von einem heftigen Winde zur Seite getrieben würden. Die Erscheinung wird durch Zusammensetzung der senkrechten Geschwindigkeit des fallenden Tropfens mit der horizontalen des Zuges bewirkt. Offenbar verhält sich die Höhe des Fensters h zur seitlichen Verschiebung des Tropfens s, wie die verticale Geschwindigkeit (c) zur horizontalen (v) d. h. es ist (wenn man von der Beschleunigung beim Fallen absieht)

$$\frac{c}{v} = \frac{h}{s}$$

oder

$$c = v \cdot \frac{h}{s}$$

Wie hier die Richtung des fallenden Tropfens wird auch diejenige eines Lichtstrahl's, indem er den Raum des Fernrohres vom Objectiv bis zum Fadenkreuz durchläuft, verändert, da sich die Erde ebenso wie der Waggon in unserem Beispiele während dessen etwas weiter bewegt hat; das Bild des Sternes am Fadenkreuze erscheint daher seitlich verschoben, außer wenn sich die Erde gerade auf den Stern zu oder von ihm fort bewegt. Ist die Bewegung des Lichtstrahles, dessen Geschwindigkeit wir nun durch c bezeichnen, zur Bewegung der Erde senkrecht, bezeichnen wir ferner die Länge des Fernrohres vom Objectiv bis zum Fadenkreuze durch h, die seitliche Verschiebung des Bildes durch s, so ergiebt die Beobachtung für diesen Fall:

$$\frac{h}{s} = \frac{1}{0{,}0001} = 1000,$$

mithin, da die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn

$$v = 4{,}15 \text{ Meilen}$$

ist, auch

$$c = \frac{h}{s} v = 41500 \text{ Meilen},$$

was mit dem obigen, aus der Verfinsterung der Jupitertrabanten erhaltenen Resultate sehr nahe übereinstimmt.

Die Aberration liefert auch, wie beiläufig bemerkt werden

mag, einen indirecten Beweis dafür, daß die Erde sich mit der oben angegebenen Geschwindigkeit im Raume weiter bewegt.

Wir wollen nun noch in Kürze die von Fizeau angewandte Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit erläutern, einmal, weil dieselbe äußerst sinnreich ist, sodann, weil die Vergleichung der durch dieselbe erhaltenen Werthe der Geschwindigkeit des von einer irdischen Quelle ausgegangenen Lichtes mit den aus astronomischen Messungen gewonnenen besonderes Interesse gewährt.

Das Fizeau'sche Verfahren, dessen Idee von Arago herrührt, ist im Wesentlichen folgendes: Man denke sich von einem intensiv leuchtenden Punkte (L) einen Lichtstrahl unter einem Winkel von 45^0 auf ein unbelegtes Spiegelglas (s) fallend und ein gezahntes Rad so aufgestellt, daß der von s reflectirte Strahl durch eine Zahnlücke hindurch zu einem zweiten in weiter Entfernung (E) aufgestellten, belegten Spiegel (S) gelangen kann. Trifft er diesen senkrecht, so wird er in sich selbst reflectirt und kann so wiederum zum Rade gelangen, nachdem er hin und zurück die Strecke $2\,E$ durchlaufen hat. Steht das Rad still, so geht der reflectirte Strahl ungehindert durch dieselbe Zahnlücke hindurch, durch welche er von s nach S gelangte und ein hinter dem unbelegten Spiegel befindliches Auge wird ihn folglich wahrnehmen, d. h. ein Spiegelbild des Lichtpunktes L sehen können. Wird aber das Rad hinreichend schnell gedreht, so daß in derselben Zeit, welche der Strahl gebraucht, um die Entfernung $2\,E$ zu durchlaufen, ein Zahn an die Stelle der Lücke getreten ist, so kann der Strahl beim Rückgange nicht in das Auge des Beobachters gelangen und der Lichtpunkt wird zu verschwinden scheinen. Bei doppelt so schneller Drehung des Rades wird der Strahl bei seiner Rückkehr wiederum auf eine Zahnlücke treffen, der Lichtpunkt wird also wiederum sichtbar werden, und also abwechselnd verschwinden und wieder erscheinen, wenn man die Umdrehung des Rades mehr und mehr steigert. Legt nun das Licht den Weg $2\,E$ während t Secunden zurück und hat sich während dieser Zeit das Rad um den Bogen, welcher einer Zahnlücke entspricht, gedreht, bezeichnet man ferner wie oben die Geschwindigkeit des Lichtes durch c, so ist offenbar

$$ct = 2E$$

also
$$c = \frac{2E}{t}.$$

Nun hatte das Rad in dem Apparate Fizeau's 720 Zähne und drehte sich, als das Licht zuerst vollständig verschwand, 12,6 mal in der Secunde herum; E gleich 8633 Meter. Demnach ist

$$t = \frac{1}{12{,}6.\ 1440} \text{ Sekunden}$$

(da die Lücke den 1440ten Theil der Peripherie einnimmt) mithin wird

$$c = 2.\ 8633.\ 12{,}6.\ 1440 = 313274304 \text{ Meter}$$

gleich oder 42219 geographische Meilen. Diese Zahl welche Fizeau als Mittel aus 28 Versuchen erhielt, weicht von der durch Verfinsterung der Jupitermonde gefundenen nur etwa um $^1/_{44}$ des ganzen Werthes ab.

Durch Anwendung desselben Verfahrens ist es Foucault gelungen, nachzuweisen, daß das Licht sich, wie es nach der Vibrationshypothese sein muß, in dichteren Medien, z. B. im Wasser, langsamer bewegt als in der Luft.

In neuester Zeit hat Cornu die Versuche Fizeau's wiederholt und als Mittel aus mehr als tausend einzelnen Beobachtungen für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts in der Luft 298900 Kilometer ermittelt, was mit dem früher von Foucault erhaltenen Werthe von 298000 Kilometern sehr gut übereinstimmt.

Viertes Kapitel.

Von der strahlenden Wärme.

1. Auftreten der Wärmestrahlen im Zusammenhange mit den Lichtstrahlen. — Bei Besprechung der Zerlegung der Sonnenstrahlen durch das Prisma haben wir erwähnt, daß die verschiedenfarbigen sichtbaren Strahlen nur einen Theil des ganzen entstehenden Spectrums bilden, daß sowohl jenseits der violetten als auch der rothen noch unsichtbare Strahlen exi-

stiren, von denen die ersteren chemische Wirkungen hervorbringen, während die letzteren ihr Vorhandensein durch Wärmewirkungen bekunden. Führt man ein empfindliches Thermometer, (am besten ein Differentialthermometer) mit geschwärzter Kugel vom violetten Ende anfangend durch das von einem Flintglasprima erzeugte Spectrum, so beginnt dieses etwa in Roth zu steigen, erreicht seinen höchsten Stand aber erst außerhalb der letzten sichtbaren Strahlen. Bei einem Steinsalzprisma läßt sich die Wärmewirkung schon im Violett erkennen. Der Abstand der Stelle, wo das Maximum der Wirkung eintritt, vom äußersten Roth ist etma ebenso groß als der des Roth vom Gelb.*

Nicht nur die Sonne, sondern auch alle anderen glühenden Körper; z. B. ein durch den electrischen Strom bis zum Leuchten erhitzter Platindrath, glühende Kohlen, senden neben den sichtbaren Lichtstrahlen noch unsichtbare Wärmestrahlen aus, welche weniger brechbar als die rothen Strahlen sind. Sinkt die Temperatur eines Körpers unter eine gewisse Grenze, welche (nach Draper) bei festen Körpern zwischen 500 und 600° liegt, so verschwinden die leuchtenden Strahlen gänzlich, während er noch Wärmestrahlen aussendet. Das Vorhandensein derselben erkennt man häufig durch das bloße Gefühl, wenn man einem heißen Körper (z. B. Bügeleisen, Lampenkamin) die Rückenfläche der Hand oder eine andere empfindliche Hautstelle nähert. Da die entstandene mehr oder minder lebhafte Wärmeempfindnng sofort verschwindet, wenn man einen Schirm (von Pappe oder Holz) vor die getroffene Stelle hält, so kann die Wärme nicht von der Luft, welche dabei unter Umständen ganz kalt bleibt, fortgeleitet sein. Daß die Luft in diesem Falle bei der Fortpflanzung der Wärme keine wesentliche Rolle spielt, diese vielmehr durch sie hindurch direct von der Wärmequelle auf die Hand übertragen wird, lehrt auch die Thatsache, daß die Wirkung ebenso im luftleeren Raume stattfindet, wie ja auch die Sonnenwärme durch

* Nach neueren Untersuchungen ist die Zunahme der Wärmewirkung bis zu dem Punkte wo sie den höchsten Grad erreicht, nicht stetig, sondern zeigt mehrere Maxima und Minima.

den Weltraum fortgepflanzt wird. Da nun dieser nach der herrschenden Ansicht außerhalb der Grenzen der Atmosphäre nur mit Lichtäther erfüllt ist, da ferner die dunkeln Wärmestrahlen nach denselben Gesetzen fortgepflanzt, reflectirt und gebrochen werden wie die Lichtstrahlen, ja sogar die Erscheinungen der Polarisation, Doppelbrechung und Interferenz an ihnen hervorgerufen werden können, welche sich nur aus der Vibrationshypothese (vergl. pag. 385 u. f.) erklären lassen: so wird man zu der Annahme gedrängt, daß die Wärmestrahlen eine specielle Klasse von Lichtstrahlen bilden, wie diese in Aetherschwingungen bestehen und sich von ihnen nur durch eine größere Vibrationsdauer resp. Wellenlänge unterscheiden. Lichtstrahlen sind also nach dieser Anschauungsweise als sichtbare Wärmestrahlen zu betrachten, während die unsichtbaren Wärmestrahlen als dunkele Lichtstrahlen bezeichnet werden könnten, wenn in dieser Ausdrucksweise nicht ein Widerspruch läge. Die sichtbaren Wärmestrahlen umfassen ein Intervall von 400 bis 800 Billionen Schwingungen in einer Secunde, die dunkeln Wärmestrahlen, soweit wir sie durch unsere Instrumente nachweisen können, beginnen etwa bei 66 Billionen, die unsichtbaren chemischen Strahlen überschreiten 1000 Billionen Schwingungen.

Daß wir die Wärmestrahlen nur zum Theil vermittelst des Auges wahrnehmen, erklärt sich daraus, daß die langsamer schwingenden Strahlen nicht die wässerigen Flüssigkeiten desselben durchdringen, also auch auf die Netzhaut keine Wirkung ausüben können. Uebrigens zeigt sich auch hier eine sehr bemerkenswerthe Analogie zwischen Auge uud Ohr, insofern wir durch das letztgenannte Organ auch nicht alle regelmäßigen Luftschwingungen als Töne wahrnehmen, sondern nur diejenigen deren Vibrationsgeschwindigkeit innerhalb gewisser Grenzen liegt, nämlich zwischen 30- und 25000 Doppelschwingungen in der Secunde.

Da die Körper, wie die Versuche lehren, bei jeder Temperatur Wärmestrahlen aussenden, die Aethervibrationen aber doch nur aus anderen Bewegungen hervorgehen können, so ist es höchst wahrscheinlich, daß die Atome der Körper selbst sich in

vibrirender Bewegung befinden. Eine wesentliche Stütze dieser Annahme liegt in dem innigen Zusammenhange, welcher zwischen Wärme und Bewegung überhaupt stattfindet, und seinen allgemeinsten Ausdruck in dem Satze vom Wärmeäquivalent gefunden hat.

Nur wenn man annimmt, daß Wärmeverlust gleichbedeutend ist mit einem Verluste an Bewegung, läßt sich die mechanische Bedeutung und zugleich a priori die Richtigkeit des genannten Satzes erkennen, welcher bekanntlich zuerst auf experimentellem Wege gefunden wurde. Indem er dann nämlich nichts anderes aussagt, als daß jedem Verluste an lebendiger Kraft der Atome eine ihr aequivalente äußere Arbeit entspricht, erscheint er nur als ein specieller Fall des allgemeinsten mechanischen Gesetzes von der Erhaltung der Kraft (vergl. pag. 31).

2. **Instrumente zur Untersuchung der strahlenden Wärme.** Da die Hautnerven, das einzige Organ, durch welches wir die strahlende Wärme direct wahrzunehmen vermögen, bei weitem nicht die Feinheit und Sicherheit der Empfindung besitzen, welche das Auge gegen das Licht oder das Ohr gegen den Schall zeigen, so mußten die Physiker dieselben durch möglichst empfindliche Instrumente zu ersetzen suchen, vermittelst derer die unsichtbare Molekularbewegung in eine sichtbare umgesetzt und auf diese Weise wahrnehmbar wird. Ein solches Instrument ist das Thermometer, namentlich das Differentialthermometer, mit welchem in der That wichtige Entdeckungen über die strahlende Wärme gemacht sind (Wärmespectrum!). In neuerer Zeit wendet man zu Untersuchungen auf dem vorliegenden Gebiete gewöhnlich den **Thermomultiplicator** an, dessen Einrichtung bereits pag. 56 im Allgemeinen beschrieben ist. Um die Empfindlichkeit desselben zu erhöhen, überzieht man die Oberfläche der Thermosäule, welche aus möglichst vielen auf einen kleinen Raum zusammengedrängten Elementen bestehen muß, mit Ruß, weil dieser Körper die Wärmestrahlen besonders gut absorbirt, und versieht sie außerdem mit einem trichterförmigen Hohlspiegel (konischen Reflector), um die Menge der auf die Säule fallenden Strahlen noch zu vergrößern.

3. **Für Wärmestrahlen gelten dieselben Gesetze wie für die Lichtstrahlen.** Die von einem Körper ausgehenden und nach allen Richtungen hin sich verbreitenden Wärmestrahlen werden von den umgebenden Körpern theils reflectirt, theils hindurchgelassen und dabei unter Umständen gebrochen, theils absorbirt. Daß bei diesen Vorgängen dieselben Gesetze herrschen wie für die Lichtstrahlen, läßt sich mit Hülfe der Thermomultiplicator in ähnlicher Weise zeigen, wie es in der Optik näher erklärt ist. Wir werden daher, indem wir dazu übergehen die Ergebnisse der Untersuchungen über das Verhalten der Wärmestrahlen in den verschiedenen angedeuteten Beziehungen darzulegen, hauptsächlich diejenigen Thatsachen berücksichtigen, durch welche besondere Eigenthümlichkeiten derselben hervortreten oder welche zur Erklärung der uns im täglichen Leben entgegen tretenden Erscheinungen, namentlich der meteorologischen Vorgänge von Wichtigkeit sind.

Einige Körper, welche man **diathermane** nennt, lassen die Wärmestrahlen in ähnlicher Weise wie durchsichtige Körper die Lichtstrahlen hindurch. Je durchlässiger ein Körper ist, desto weniger Wärmestrahlen absorbirt er, desto weniger wird er also selbst durch sie erwärmt. Wir haben bereits erwähnt, daß von den festen Körpern Steinsalz am vollkommensten diatherman ist, daß ferner auch die atmosphärische Luft dieselbe Eigenschaft besitzt. Das letztere geht u. A. auch aus dem folgenden in mehrfacher Beziehung lehrreichen, zuerst von **Pictet** in Genf im J. 1788 angestellten Versuche hervor.*

Stellt man zwei große metallene Hohlspiegel so auf, daß ihre Axen zusammenfallen, bringt in den Brennpunkt A des einen eine Wärmequelle (glühende Kohlen, erhitzte Kugel) in den des anderen B ein Thermometer, so zeigt dieses eine starke Steigerung der Temperatur an, auch wenn die Strahlen, welche direct von A nach B gelangen können durch einen Schirm abgehalten werden. Da ferner diese Wirkung fast augenblicklich eintritt, auch wenn

---

* Metalle reflectiren sowohl die sichtbaren wie die unsichtbaren Wärmestrahlen am besten.

die Spiegel in einer großen Entfernung von einander aufgestellt werden, so folgt daraus zunächst, daß die Wärme von der Luft nicht fortgeleitet,* sondern hindurchgelassen ist. Außerdem ergiebt sich aus dem vorstehenden Versuche aber auch, daß die Wärmestrahlen wie die Lichtstrahlen in geraden Linien fortgepflanzt und nach demselben Gesetze wie diese reflectirt werden, denn nur unter diesen Voraussetzungen werden die von *A* ausgehenden Strahlen in *B* vereinigt.

Bei Anwendung hinreichend großer Spiegel und intensiver Wärmequellen kann man in *B* Zunder oder geschwärztes Collodium (in Aether aufgelöste Schießbaumwolle) entzünden. J. Tyndall gelang es sogar, durch die von einem electrischen Flammenbogen ausgehenden Strahlen unter Anwendung nur e i n e s passend aufgestellten Hohlspiegels (von nicht mehr als 8 Zoll Durchmesser und 5 Zoll Brennweite) nicht nur leicht flüssige Metalle zu schmelzen, sondern auch Platin zum Weißglühen zu bringen, obgleich er a l l e l e u c h t e n d e n S t r a h l e n d e r g l ü h e n d e n K o h l e n s p i t z e n a b g e s c h n i t t e n hatte**. Dieser letztere Versuch ist insofern von besonderer Wichtigkeit, als bei ihm (ähnlich wie bei der Fluorescenz vergl. pag. 375) eine Verwandlung unsichtbarer Strahlen in sichtbare stattfindet, woraus ebenfalls die gleichartige Natur beider folgt.

Durch Vereinigung der von der Sonne ausgehenden Wärmestrahlen kann man selbst im Brennpunkte kleinerer Brennspiegel entzündliche Stoffe rasch entflammen oder leicht schmelzbare Metalle in Fluß bringen. Mit größeren Sammelspiegeln, wie man sie schon im vorigen Jahrhundert construirte, läßt sich selbst nasses Holz fast augenblicklich entzünden, die zurückbleibende Asche, Erde, Steine, selbst hessische Tiegel in Glas verwandeln. In neuester Zeit hat man sogar versucht, die durch Hohlspiegel concentrirte Sonnenwärme zum Betriebe von Maschinen zu benutzen.

---

* Das Wärmeleitungsvermögen der Luft ist sehr gering.

** Indem er dieselben vor ihrer Vereinigung durch eine Auflösung von Jod in Schwefelkohlenstoff gehen ließ, welche sich in einem Glastrog befand. Diese vollkommen undurchsichtige Flüssigkeit läßt die dunkeln Wärmestrahlen fast vollständig hindurch.

Brechung der Wärmestrahlen. Ueber die Brechung der Wärmestrahlen ist der Hauptversuch schon im Eingange dieses Kapitels angeführt worden. Ein Körper sendet um so brechbarere Strahlen aus, je höher seine Temperatur gesteigert wird, bis endlich neben den dunkeln auch leuchtende Strahlen auftreten.

Durch Linsen, welche aus einem diathermanen Stoffe, am besten aus Steinsalz, gefertigt sind, lassen sich die dunkeln Wärmestrahlen vereinigen, so daß ihre Wirkung verstärkt wird.

Ausstrahlung. — Die Menge der von einem Körper ausgesendten Strahlen wächst, wie schon die oberflächliche Beobachtung lehrt und bereits oben bemerkt wurde, mit der Temperatur, hängt aber außerdem von der Natur des strahlenden Körpers und namentlich von der Beschaffenheit seiner Oberfläche ab. Je dichter die letztere ist, desto geringer ist im Allgemeinen das Strahlungsvermögen. Genauere Versuche darüber sind zuerst von Leslie (1804) ausgeführt worden. Er stellte einen hohlen, mit heißem Wasser gefüllten Würfel von Messingblech einem Hohlspiegel gegenüber so auf, daß diejenige Seitenfläche, deren Ausstrahlung untersucht werden sollte, von der Axe des Spiegels in ihrem Mittelpunkte durchschnitten würde, während er in den Brennpunkt die eine Kugel des von ihm erfundenen Differentialthermometers brachte. Wurde die Seitenfläche des Würfels mit Ruß überzogen, so strahlte sie viel stärker aus, als wenn sie blank polirt war. Ebenso bringt ein Ueberzug von Hausenblase, Bleiweiß, oder Karmin eine Verstärkung der Strahlung hervor, während dieselbe sehr schwach wird, wenn die strahlende Fläche mit einer dünnen polirten Metallschicht (von Gold, Silber, Kupfer, Zinn) bedeckt ist. Stärker als eine polirte, strahlt eine geritzte Metallfläche, noch stärker eine Glasfläche aus. Aus einer blanken silbernen oder zinnernen Theekanne geht daher weniger Wärme durch Strahlung verloren, als aus einem gläsernen oder irdenen Gefäße. Ueberzieht man von zwei ganz gleichen Gefäßen (z. B. Leslie'schen Würfeln) das eine mit Lampenruß, füllt beide mit siedenden Wasser und steckt Thermometer hinein, so steht nach Verlauf einiger Zeit das in den berußten Gefäße befindliche merklich tiefer. Will man den Wärmeverlust z. B. aus einer

Kaffeekanne durch einen Ueberzug von Wolle vermindern, so muß man denselben lose überdecken, da ein fest anliegender ähnlich wie Ruß wirkt. Als Melloni die Flächen des Leslie'schen Würfels mit verschiedenfarbigem Sammet überzog, wurde die Ausstrahlung vermehrt, gleichgültig welche Farbe der Sammet hatte. Dasselbe gilt für die Ausstrahlung der Kleider, des thierischen Pelzes ꝛc. Dieses ist jedoch nur für dunkle Wärmestrahlen richtig. In Bezug auf die Absorption der leuchtenden Wärme z. B. der Sonne übt die Farbe einen großen Einfluß aus.

4. Zusammenhang zwischen Strahlung und Absorption. — Zwischen der Fähigkeit eines Körpers Wärme auszustrahlen oder zu absorbiren herrscht eine vollständige Gegenseitigkeit, insofern das Absorptionsvermögen eines Körpers im Allgemeinen um so größer ist, je größer sein Strahlungsvermögen ist und umgekehrt. Genau gesprochen gilt dieses indessen nur von Strahlen derselben Gattung, d. h. ein Körper absorbirt die Strahlen am stärksten, (auch in kalten Zustande) welche er selbst, (wenn er erhitzt wird,) auszusenden vermag.

Für die leuchtenden Strahlen haben wir diesen Satz bereits zur Erklärung der Entstehung der dunkeln Linien des Sonnenspectrums benutzt (vergl. pag. 325); er gilt indessen ganz allgemein für leuchtende und nichtleuchtende Strahlen. Experimente, welche zur Erläuterung desselben und zugleich als Belege seiner Richtigkeit dienen können, sind folgende:

a). Erhitzt man eine Steinsalzplatte und eine Glasplatte auf 100°, so zeigt sich, daß die Steinsalzplatte fast gar nicht, die Glasplatte sehr stark ausstrahlt. Dem entsprechend läßt Steinsalz dunkle Strahlen fast vollständig, Glas dagegen nur wenig hindurch. Alaun, welcher noch stärker absorbirt als Glas, strahlt auch noch stärker als dieses aus.

b). Erwärmt man ein Stück schwarzes und ein Stück durchsichtiges Glas bis zum Glühen und bringt dann beide zugleich in einen dunkeln Raum, so leuchtet das schwarze Glas stärker. Es sendet also in heißem Zustande mehr leuchtende Strahlen aus, während es in kaltem dieselben stärker absorbirt.

c). Läßt man die Strahlen einer auf 100° erhitzten Stein-

salzplatte auf eine andere ebenfalls auf 100° erhitzte Steinsalzplatte fallen, so werden etwa drei Viertel derselben absorbirt, obgleich Steinsalz jede andere Strahlengattung fast vollständig hindurch läßt.

d). Die Strahlen einer Wasserstoffflamme werden besonders stark von Wasserdampf, diejenigen einer Kohlenoxydflamme von Kohlensäure absorbirt, d. h. von denjenigen Verbindungen, welche bei der Verbrennung der genannten Gase entstehen.

Der wichtige allgemeine Satz, zu dessen Erhärtung die vorstehenden Thatsachen angeführt wurden, dient zugleich indirect zur Bestätigung der Annahme, daß die strahlende Wärme durch Vibrationen der Körperatome, welche auf den Aether übertragen werden, entsteht, insofern der Zusammenhang zwischen Absorption und Strahlung nach derselben als ein sehr natürlicher erscheint. In der Lehre vom Schalle wurde erwähnt, daß eine Saite, eine Stimmgabel, der Luftraum eines Resonators rc. in Mitschwingungen gerathen, wenn deren Eigenton in der Nähe erklingt. Singt man z. B. gegen die vom Dämpfer befreiten Saiten eines Claviers, so antworten diejenigen von ihnen, deren Eigentöne angegeben wurden. Sie absorbiren also und geben wieder aus Luftschwingungen von derselben Vibrationsgeschwindigkeit, die ihre eigenen Theilchen während des Tönens besitzen. Ebenso müssen die Moleküle der Körper durch die Vibrationen des Aethers in Mitschwingungen gerathen, wenn sie von Wärmestrahlen (Aetherwellen) getroffen werden, welche diejenige Vibrationsgeschwindigkeit besitzen, mit welcher sie selbst zu schwingen vermögen. Allerdings ist wohl anzunehmen, daß jede Wellenbewegung, welche die Oberfläche eines Körpers trifft, eine Erschütterung seiner Moleküle hervorrufen wird. Damit aber die Bewegung sich vermehre und eine wirkliche Vibration eintrete, ist eine Uebereinstimmung der Perioden nothwendig. Die Absorption entspricht also gewissermaaßen der Consonanz, die Durchlässigkeit der Dissonanz (vergl. Akustik §. 19). Ob ein Kröper für Strahlen durchlässig ist oder nicht, hängt demnach wesentlich von ihrer Qualität d. h. also von ihrer Vibrationsgeschwindigkeit ab.

5. Durchlässigkeit verschiedener Stoffe für

dunkle Wärmestrahlen. — Viele Körper, wie z. B. Glas und Alaun (vergl. weiter unten pag. 405 die Tabelle) sind für dunkle Strahlen fast undurchlässig, während sie leuchtende Strahlen, welche, wie wir wissen eine geringere Wellenlänge besitzen, fast vollständig hindurchlassen;* andere, wie z. B. Steinsalz, schwarzes Glas und namentlich eine Auflösung von Jod in Schwefelkohlenstoff sind für die dunkeln Wärmestrahlen stark durchlässig, obgleich wenigstens die beiden letztgenannten Stoffe fast gar kein Licht hindurchlassen. Im allgemeinen steigt die Durchlässigkeit mit der Brechbarkeit (oder Vibrationsgeschwindigkeit) der Strahlen.** Eine merkwürdige Ausnahme von dieser Regel macht indessen Ruß, welcher Strahlen, die von Wärmequellen höherer Temperatur ausgehen, sehr stark absorbirt, dagegen Strahlen anderer Temperatur in bedeutendem Maße hindurchläßt. So fand Melloni daß z. B. von den Strahlen des kochenden Wassers ca. 38 Procent durch eine berußte Steinsalzplatte hindurchgehen.

Strahlen, welche bereits durch einen Stoff hindurchgegangen sind, werden von demselben Stoffe nur in geringem Maße absorbirt. Umgibt man z. B. die Flamme einer Petroleumlampe mit einem Glascylinder, so gehen die von diesem hindurchgelassenen Strahlen wenig geschwächt durch eine zweite Glashülle hindurch. Wenn man daher durch eine Sammellinse von Glas die Strahlen, z. B. des electrischen Lichtes concentrirt und im Brennpunkte die gläserne mit trockener Luft gefüllte Kugel eines Diffe-

---

* So gehen die Strahlen der Sonne durch die Glasfenster der Zimmer, Treibhäuser 2c., während die aus dem Innern derselben kommenden dunkeln Strahlen von ihnen nicht hindurchgelassen werden. Man kann daher auch in einem innen geschwärzten Blechkasten welcher mit einer Glasscheibe gedeckt ist, unter Anwendung passender Reflectoren Wasser bis über die Siedetemperatur erhitzen. Die Glasscheiben bilden also in ähnlicher Weise wie der Wasserdampf der Atmosphäre eine Art Falle für die Sonnenstrahlen.

** Weil die Sonnenstrahlen Glas und andere wenig durchlässige Körper durchdringen, so hat man schon aus diesem Verhalten auf die hohe Temperatur der Sonne geschlossen, was durch die Spectralanalyse bestätigt wird.

rentialthermometers aufstellt, so steigt dieses (nach Tyndall) nicht,* die Luft in demselben bleibt also z. B. auf dem Gefrierpunkt, wenn sie vorher diese Temperatur hatte, während an derselben Stelle ein dünnes Platinblech vielleicht zur Weißgluth erhitzt werden kann. Dieser Versuch zeigt u. A. sehr deutlich die Unabhängigkeit des Aethers von der Luft in welcher er sich befindet.

Man nennt die Eigenschaft mancher Stoffe, nur eine bestimmte Gattung von Wärmestrahlen hindurch zu lassen, Thermochrose; sie entspricht ganz dem Verhalten mancher durchsichtigen Körper, welche auch nur gewisse farbige Lichtstrahlen hindurchlassen.

In der nachfolgenden Tabelle ist die Durchlässigkeit einiger fester Körper für Strahlen von 4 verschiedenen Wärmequellen nach Melloni angegeben. Die untersuchten Stoffe hatten die Form von Platten deren Dicke 2,6 Millimeter betrug.

Wärmequelle:	Durchgelassene Wärmemenge in Procenten der auffallenden			
	Oelflamme	glüh. Platin	geschwärztes Kupfer von 390°	siedendes Wasser in geschwärzt. Kupfergefäße
Steinsalz, klar	92	92	92	92
„ durchsichtig	65	65	65	65
Kalkspath, klar	39	28	6	0
Spiegelglas	39	24	6	0
Bergkrystall	38	28	6	0
Gyps	14	5	5	0
Alaun	9	2	0	0

Die Thermochrose tritt besonders deutlich bei den letzten 5 Stoffen hervor.

Ueber das Absorptionsvermögen der Gase sind in neuerer Zeit besonders von Tyndall Untersuchungen angestellt worden. Die Gase wurden dabei in eine 32 Zoll (engl.) lange, im Innern

* Die Glaslinse und die Luft wirken hier auf die Strahlen ähnlich wie ein Sieb oder Filter.

polirte Röhre von Zinn eingeschlossen, deren Mündungen durch zwei Steinsalzplatten hermetisch verschlossen werden. Die Röhre stand mit einem Gasometer, einer Luftpumpe und einem Manometer in Verbindung, welches letztere dazu diente, den Druck des Gases zu messen. Die Wärmequelle war gebildet durch eine Kupferplatte, welche durch eine regelmäßig brennende Flamme eines Bunsen'schen Gasbrenners erhitzt wurde. Die Resultate der mit größter Sorgfalt angestellten Messungen sind in der nachstehenden Tabelle enthalten, in welcher aber nur die bekannteren und in ihrem Verhalten besonders merkwürdigen Gase aufgeführt sind.

Name des Gases	Absorption bei einem Drucke von 30 engl. Zoll (1 Atmosphäre)	Absorption bei einem Drucke von 1 Zoll Quecksilber
Atmosph. Luft (getrocknet)	1	1
Sauerstoff	1	1
Stickstoff	1	1
Wasserstoff	1	1
Chlor	39	60
Chlorwasserstoff (Salzsäure)	62	160
Kohlenoxyd	90	750
Kohlensäure	90	1005
Stickoxydul	355	1590
Schwefelwasserstoff	390	1860
Sumpfgas	403	2100
Schweflige Säure	710	7260
Oelbildendes Gas	970	7950
Ammoniak	1195	8800

Wie man sieht, sind die Unterschiede in der Durchlässigkeit auch bei vollkommen durchsichtigen Gasen ganz außerordentlich groß*; sie treten noch mehr hervor, wenn man die Gase ver-

* Die Undurchlässigkeit des Ammoniakgases ist so groß, daß es fast gar keinen Unterschied hervorbrachte, wenn zwischen das Ende der Versuchsröhre und dem Thermomultiplicator, durch welchen die Strahlen aufgefangen wurden, eine Metallplatte gehalten wurde.

dünnt. Für geringe Drucke zeigte sich die Durchlässigkeit dem Drucke proportional.

Die obige Tabelle lehrt ferner, daß die einfachen Gase und trockene atmosphärische Luft (bekanntlich ein Gemenge von den einfachen Gasen Stickstoff und Sauerstoff und ein wenig Kohlensäure) auffallend wenige Strahlen absorbiren. Es ist dieses um so bemerkenswerther, als auch andere einfache Körper in festem Zustande, nämlich die Metalle, wie: Gold, Silber, Kupfer, welche stark reflectiren, schwach ausstrahlen, folglich auch schwach absorbiren. Die Moleküle der Elemente bewegen sich also wie es scheint im Aether, ohne auf denselben viel von ihrer Kraft zu übertragen. Es geht dieses schon daraus hervor, daß sie im luftleeren Raume sehr langsam abkühlen. Die Moleküle der zusammengesetzten Gase dagegen übertragen viel Bewegung auf den Aether. Tyndall vergleicht daher in Bezug auf dieses Verhalten die Theilchen der einfachen Körper mit einem im Wasser sich drehenden glatten Cylinder, diejenigen der zusammengesetzten Gase mit einem Schaufelrade.

Auch die Dämpfe zusammengesetzter Stoffe haben selbst bei schwacher Spannung ein verhältnißmäßig starkes Absorptionsvermögen. Nimmt man die Absorption der trockenen Luft von gewöhnlichem Druck als Einheit an, so ergibt sich diejenige der nachbenannten Dämpfe wie folgt:

Name der Substanz	Absorption des Dampfes bei einem Drucke von 0,1	0,5	1 Zoll Quecksilber
Schwefelkohlenstoff	15	47	62
Schwefeläther	300	710	870
Alkohol	327	622	
Essigäther	590	980	1195
Borsäure	620		

Die Absorption der Borsäure, welche bei einem Drucke von $1/10$ Zoll schon 620 mal so groß ist, als diejenige der Luft bei dem Drucke von 30 Zoll würde, wie Tyndall bemerkt, wenn sie mit derjenigen der Luft bei einem für beide gleichen Drucke von

0,01 Zoll verglichen wäre, wahrscheinlich 180000 mal größer gewesen sein.

Für die Anwendung auf die Meteorologie ist es besonders wichtig, daß der Wasserdampf dunkle Wärmestrahlen von großer Wellenlänge ebenfalls kräftig absorbirt, indem er für gewöhnlich eine etwa 70 mal so starke Absorption ausübt, als die Luft selbst. Bis zum Drucke einer Atmosphäre ist sein Absorptionsvermögen der Dichtigkeit nahezu proportional.

Wie in der Einleitung erwähnt wurde, durchdringen die von der Sonne zur Erde gesendeten Wärmestrahlen, wahrscheinlich wegen der außerordentlich hohen Temperatur dieses Weltkörpers (vergl. oben pag. 404), verhältnißmäßig wenig geschwächt die Atmosphäre und erwärmen zunächst die Erdoberfläche, welche dadurch zur Wärmequelle wird, die jedoch nur Strahlen von größerer Wellenlänge aussendet.* Da der Wasserdampf für diese wenig durchlässig ist, so wird der größte Theil derselben schon in einer geringen Entfernung von der Erdoberfläche absorbirt, nach Tyndall für gewöhnlich schon zehn Procent in einer Höhe von nur zehn Fuß über der Erdoberfläche, bedeutend mehr, wenn die relative Feuchtigkeit groß ist. Der Wasserdampf der Atmosphäre

---

* Ein dem obigen ganz analoger Vorgang findet in einer frisch geheizten Stube statt. Wie die Sonnenstrahlen von der Atmosphäre werden die von dem Ofen resp. dem Feuer ausgehenden Strahlen von der Luft des Zimmers hindurchgelassen und erst von den Wänden absorbirt. Die letzteren werden daher zuerst erwärmt, während die Luft noch kalt bleibt. Man sieht deshalb im Winter zunächst die Fensterscheiben abthauen, namentlich an den Stellen, welche dem Ofenloche gegenüberliegen und daher von den directen Strahlen des Feuers getroffen werden. Bedeckt man eine solche Stelle mit einem undurchlässigen Schirm, so bleibt der dem Schatten desselben entsprechende Theil so lange unverändert bis die angrenzende Luft den zum Schmelzen des Eises erforderlichen Temperaturgrad erreicht hat. Die letztere erhält aber ihre Wärme (durch Leitung) beim Vorüberstreichen an der erhitzten Oberfläche des Ofens und den durch ihn erwärmten Wänden. Daß diese dabei eine wesentliche Rolle spielen, lehrt die bekannte Erfahrung, daß ein mehrere Tage nicht geheiztes Zimner, in welchem die Wände ebenfalls erkaltet sind, nur sehr schwierig, gewöhnlich erst durch mehrmaliges Heizen erwärmt werden kann.

bildet daher eine Art Falle für die Sonnenstrahlen.* Ohne ihn würde die Erde die empfangene Wärme schnell durch Strahlung in den Weltraum verlieren, und die Gegensätze zwischen Hitze und Kälte würden so plötzlich und stark hervortreten, daß die Erde dadurch unbewohnbar würde, etwa wie der Mond. In Gegenden wo die Luft trocken und klar ist, wie z. B. auf hohen Bergen, machen sich die Temperaturgegensätze in höchst empfindlicher Weise bemerkbar.** Auf dem Hochlande von Tibet ist der Winter deswegen fast unerträglich, und in der Sahara ist die Abkühlung des Nachts trotz der Glühhitze des Bodens und der Luft während des Tages oft so bedeutend, daß sich Eis bildet.

Weil der Wasserdampf ein starkes Absorptionsvermögen für dunkle Wärmestrahlen besitzt, muß er nach dem früheren auch stark ausstrahlen. Dieses ist von Wichtigkeit für die Erklärung der Wolkenbildung. Sobald eine Dampfmasse frei ausstrahlen kann, muß sie rasch abgekühlt und verdichtet werden. Diese Verdichtung wird in der Atmosphäre aber offenbar erst an der oberen Grenze der Dampfschicht eintreten können, welche bis zu einer gewissen Höhe auf der Erdoberfläche lagert und die Strahlung verhindert.

Absorption riechender Substanzen. — Auffallend stark ist auch das Absorptionsvermögen wohlriechender Substanzen selbst im Zustande größter Verdünnung. So wirkt z. B. Patchouli 30 mal, Rosenöl 36 mal, Anisöl gar 372 mal so stark als atmosphärische Luft, während ihre Dichtigkeit wohl millionenmal geringer war.

Besonders merkwürdig ist das Verhalten des Ozons, jener eigenthümlichen durch Electricität hervorgerufenen Modification des

---

* Auf diesen Grund für die Abnahme der Temperatur der Luft mit der Höhe wurde bereits in der Einleitung hingewiesen.

** Nach seiner Aussage litt Tyndall niemals so durch den Sonnenbrand als auf der Höhe des Montblanc, während die Luft im Schatten der Felswände empfindlich kalt war. Ebenso klagen Luftschiffer über die unerträgliche Hitze an den von der Sonne beschienenen Körpertheilen, während die im Schatten der Gondel befindlichen vor Kälte erstarren.

Sauerstoffes. Dasselbe übt, künstlich abgekühlt, (durch Wärme wird es bekanntlich zerstört) eine 136 mal so starke Absorption aus, als gewöhnlicher electrolytischer Sauerstoff. Dabei sind die Mengen Ozon, welche eine solche Wirkung hervorbringen durch gewöhnliche Mittel gänzlich unmeßbar.

Es ist nach dem Vorhergehenden nicht unmöglich, daß es gelingen wird, sehr geringe Mengen von gewissen der Luft beigemengten Substanzen durch Beobachtung der Absorption, welche sie gegen strahlende Wärme zeigen, zu bestimmen, in ähnlicher Weise wie man seit der Entdeckung der Spectralanalyse aus dem Auftreten gewisser Absorptionsstreifen in einem sonst continuirlichen Spectrum auf die Anwesenheit gewisser Stoffe schließt. Da innerhalb gewisser Grenzen die Größe der Absorption der Dichtigkeit des zu untersuchenden Gases oder Dampfes proportional ist, so wird es auf diesem Wege sogar vielleicht gelingen quantitative Bestimmungen zu machen und zwar in solchen Fällen, wo alle andern Hülfsmittel versagen. Tyndall hat mit befriedigendem Erfolge den Versuch gemacht dieses Princip zur Bestimmung der Menge Kohlensäure in der ausgeathmeten Luft zu benutzen.

6. Beziehung zwischen der Absorption der Flüssigkeiten und ihrer Dämpfe. — Zwischen der Absorption der Dämpfe und der Flüssigkeiten findet insofern eine enge Beziehung statt, als beide nach ihrem Absorptionsvermögen geordnet dieselbe Reihenfolge zeigen, wenn proportionale Mengen derselben untersucht werden. Da man nun weiß, daß Wasser ein kräftiger Absorbent für dunkle Wärmestrahlen ist, so würde man hiernach schon auf ein gleiches Verhalten des Wasserdampfes schließen müssen, auch wenn dieses nicht durch directe Versuche erwiesen wäre.

Da Wasser und Wasserdampf dieselben Strahlengattungen absorbiren, folglich auch hindurchlassen, so ist es nicht unwahrscheinlich, daß die blaue Farbe des reinen Wassers auch seinem Dampfe zukommen werde. Vielleicht erklärt sich so die blaue Farbe der Atmosphäre durch ihren Gehalt an Wasserdampf, zu-

mal es bekannt ist, daß die bläuliche Farbe z. B. ferner Hügel um so dunkler erscheint, je feuchter die Luft ist.

7. Entstehung des Thaues. — Die Gesetze der Wärmestrahlung liefern die vollständige Erklärung für die Bildung des Thaues, wie Wells in London im Jahre 1818 gezeigt hat. Wie früher erwähnt ist, wird der in der Luft enthaltene Wasserdampf verdichtet, wenn die Temperatur derselben bis unter den Thaupunkt sinkt. Befindet sich also ein noch stärker abgekühlter Körper in der Luft, so muß eine Verdichtung eintreten und die Oberfläche des Körpers wird sich mit Thau bedecken, wie wir dieses an den durch die äußere Luft abgekühlten Fensterscheiben oder an einem Glase mit kaltem Wasser beobachten, welches in eine warme Stube gebracht wird.

Bei klaren Himmel kann es nun, wie Wells durch zahlreiche Versuche gezeigt hat, vorkommen, daß die Temperatur gut ausstrahlender Körper, wie Wolle, Pflanzenblätter, namentlich Gräser, durch Ausstrahlung gegen den Weltraum tief unter die Temperatur der umgebenden Luft sinkt. So fand er einst auf einer Wiese eine um 6°,6 C. tiefere Temperatur, als einige Fuß darüber in der Luft. Bei geeignetem Feuchtigkeitsgehalt der Luft ist die Thaubildung um so reichlicher, je größer die Temperaturdifferenz zwischen dem bethauten Körper und der umgebenden Luft ist.*

Das Sinken der Temperatur und damit auch die Thaubildung wird einmal durch Luftströmungen, sodann durch vorüberziehende Wolken, wie auch durch künstliche Schirme vermindert. Daher ist auch die Thaubildung bei bedeckten Himmel und bewegter Luft viel geringer als bei heiterem Himmel und Windstille. Gegenstände, welche sich unter einem Dache befinden, bethauen wenig oder gar nicht. Die Gärtner bedecken Pflanzen, um sie vor dem Erfrieren zu bewahren mit dünnen Strohmatten.

Der Grund, weshalb der Wasserdampf trotz seines kräftigen Strahlungsvermögens nicht ebenso schnell als das Gras abgekühlt

---

* Wells wies dieses nach, indem er in Baumwollenbüschel Thermometer senkte und die Menge des entstandenen Thaues durch Wägung bestimmte.

wird, liegt darin, daß derselbe nicht nur seine eigene Wärme entladen muß, sondern auch diejenige der atmosphärischen Luft in der er sich befindet, deren Masse die seinige gewöhnlich um mehr als das Hundertfache übertrifft.

Körper, welche schlecht ausstrahlen, wie Kiesel, polirte Metalle, bethauen nicht oder viel schwächer. Wells legte eine polirte Metallplatte auf das Gras und auf diese ein gewöhnliches Thermometer und eins mit vergoldeter Kugel. Das letztere und die Metallplatte blieben trocken, während das gut ausstrahlende unbedeckte Thermometer bethaute, zugleich aber um 5° C. tiefer stand als das nicht bethaute*.

Sinkt die Temperatur eines strahlenden Körpers unter den Gefrierpunkt, so entsteht statt des Thaues Reif. Aehnlich erklärt sich auch die künstliche Bildung von Eis in Bengalen. Man gräbt dort flache Gruben, füllt sie mit Stroh und setzt darauf bei klarem Himmel flache mit Wasser gefüllte Schalen. Das Wasser strahlt kräftig aus, während die verlorene Wärme wegen des nicht leitenden Strohes von der Erde aus nicht ersetzt wird.

8. Temperatur-Gleichgewicht der Erde. — Die von der Erde durch Strahlung in den Weltraum verlorene Wärme wird durch die von der Sonne und den Sternen empfangene vollständig ersetzt, da die mittlere Temperatur der Erde sich seit historischen Zeiten kaum merklich verändert hat. Eine durch größere Wärmeausgabe hervorgebrachte Abkühlung mußte nämlich mit einer Zusammenziehung, folglich Vergrößerung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde verbunden sei. Nach Laplace hat sich aber seit Hipparch, der zur Zeit der Ptolemäer (zwischen 160 und 125 v. Chr.) lebte, die Länge des Tages nicht um 0,01 Secunde verringert;** nach den neueren noch genaueren Untersuchungen des britischen Astronomen Adams hat dieselbe viel-

* Ein Thermometer zeigt daher niemals die Temperatur der Luft richtig an. Der Sonne ausgesetzt steht es höher, im Schatten häufig tiefer, während jede vorüberziehende Wolke seinen Stand verändert.

** In Paris, in einer Tiefe von 27 Metern hat sich seit hundert Jahren die Temperatur des Bodens in den Kellern der Sternwarte nicht im geringsten geändert.

mehr um 0,01197 Secunden in den letztverflossenen 200 Jahren zugenommen.

Anmerkung. Daß eine solche Zunahme stattfinden müsse war schon im Jahre 1754 von Kant behauptet worden, während neuerdings durch Mayer, den berühmten Urheber der mechanischen Wärmetheorie, darauf hingewiesen ist, daß durch die Anziehung der stets östlich vom Meridian des Mondes gelegenen Fluthwelle eine allmälige Verminderung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde eintreten müsse. Möglicherweise wirkt übrigens der Widerstand des den Weltraum erfüllenden Aethers in demselben Sinne.

Schließlich sei erwähnt, daß man versucht hat, die von der Sonne ausgestrahlte Wärme vermittelst des von Pouillet erfundenen Pyrheliometers zu messen. Der Haupttheil desselben ist ein dosenförmiger, mit einer Glasplatte bedeckter und im Innern geschwärzter Cylinder, welcher mit Quecksilber oder Wasser gefüllt wird; in demselben befindet sich die Kugel eines Thermometers. Man richtet die Grundfläche des Cylinders senkrecht gegen die Sonne und beobachtet an dem Thermometer die während einer gewissen Zeit hervorgebrachte Erwärmung, bestimmt außerdem durch eine zweite Beobachtung die Ausstrahlung des Instrumentes. Nach den ziemlich übereinstimmenden Versuchen von Pouillet in Paris und Herschel am Kap der guten Hoffnung würde die in einer Minute von der im Zenith stehenden Sonne ausgestrahlte Wärme hinreichen, auf der Meeresfläche eine Eisschicht von 0,00728 Zoll Dicke zu schmelzen. Durch die ganze in einem Jahre aufgenommene Wärmemenge würde demnach bei gleichmäßiger Vertheilung über die Erdoberfläche, eine Schicht Eis von 100 Fuß Dicke, welche die ganze Erde bedeckt, geschmolzen werden. Durch dieselbe Wärmemenge könnte man einen 15 Meilen tiefen Ocean von süßem Wasser von der Temperatur des schmelzenden Eises bis zur Siedehitze erwärmen.

Autoren-Verzeichniß.

Die Zusätze sind Poggendorff's Handwörterbuch entnommen.

Adams, George, 1750—1795, Optikus und Mechanikus in London.

Airy, George Bidell, geb. 1801, Professor zu Cambridge und später Director der Sternwarte zu Greenwich.

Ampère, André Marie, 1775—1836, Professor an der polytechnischen Schule, am collège de France und Mitglied der Academie.

Arago, Dominique François Jean, 1786—1853, Director der Pariser Sternwarte.

Archimedes, 272—212 v. Chr.

Aristoteles, 384—322 v. Chr.

August, Ernst Ferdinand, 1795—1870, Director des Cöln. Realgymnasiums in Berlin.

Becquerel, Antoine César, geb. 1788, Professor am naturhistorischen Museum und Mitglied der Academie.

Becquerel, Alexandre Edmond, geb. 1820, Professor am Conservatoire des arts.

Bessel, Friedrich Wilhelm, 1784—1846, Director der Königsberger Sternwarte.

Biot, Jean Baptiste, 1774—1862, Professor am collège de Fance und Mitglied des Instituts und des Längenbureau.

Boyle, Robert, 1627—1691, reicher Privatmann und Präsident der Royal Society.

Bramah, Joseph, 1749—1844, Mechanikus und Ingenieur in London.

Brewster, Sir David, 1781—1868, Professor zu St. Andrews, Mitglied der Royal Society.

Bunsen, Robert Wilhelm, geb. 1811, Professor zu Heidelberg.

Carlini, Francesco, geb. 1783, Director der Sternwarte zu Mailand.

Cavendish, Henry, 1731—1810, reicher Privatmann, Mitglied der Royal Society und des Instituts zu Paris.

Celsius, Anders, 1701—1744, Professor zu Upsala.

Charles, Jacques Alexandre César, 1746—1823, Professor der Physik am Conservatoire des arts zu Paris.

Tyndall, John, geb. 1820, Mitglied der Royal Society zu London.

Watt, James. 1736—1819, Mitglied der Royal Society zu Edinburgh und London.

Weber, Wilhelm Eduard, geb. 1804, Professor zu Göttingen.

Wertheim, Wilhelm, 1815—1861, Examinator bei der Ecole polytech. zu Paris.

Wild, Heinrich, geb. 1833, Director des Centralobservatoriums für Meteorologie in St. Petersburg.

Wollaston, William Hyde, 1766—1828, Mitglied der Royal Society zu London.

Young, Thomas, 1773—1829, Mitglied der Royal Society.

Verbal-Erklärung einiger Kunst- und Fremdwörter.

Absorbiren, absorbere, verschlucken — Absorption.

Accord — chorda, accordare, accorder, Gleichung.

Achromatisch α und χρωμα — farblos.

Adhäsion — adhaerere — anhängen.

Aggregat — aggregare — ansammeln.

Aequator — aequare — gleichmachen.

Aithrioskop — αἰθηρ und σκοπειν — Aether und sehen.

Aktinometer — ακτιν und μετρειν — Strahl und messen.

Akt — agere, actum — Vorgang.

Akustik — ακουείν — hören.

Anemometer — ανεμος und μετρειν Wind und messen.

Amplitude — amplus — weit — die Weite der Ausbeugung.

Apsiden (linie) αψις, Knoten; Knotenlinie.

Araeometer — αραιος und μετρειν — trocken und messen.

Atherman — α und θερμη — die Wärme nicht durchlassend.

Atom — α und τεμνειν — das Unzerschneidliche.

Atmosphäre — ατμος und σφαιρα — Dampf und Kugel.

Barometer — βαρυς schwer und μετρειν.

Capillarität — capillus, Haar — Wirkung der Haarröhrchen.

Capacität — capax — Fassungsfähigkeit.

Coefficient — cum ex facere — mitausmachende Zahl, die Zahl, welche angibt, wie oft eine andere als Summande gesetzt werden soll.

Cohäsion — cohaerere — zusammenhaften.

Combination — (combinare) — zu je zweien mit einander verbinden, Verbindung überhaupt.

Communicirend — (communicare) — gemeinschaftlich ausmündend.

Compension — compensare — ausgleichen.
Complement — complere — ergänzen.
Complex — complecti — zusammenfassen.
Condension — Condensator — condensare — verdichten.
Concav — concavus — hohl.
Conglomerat — conglomerare — zusammenknäueln.
Consonanz — consonare — zusammentönen — Eintönigkeit.
Constant — constans — beständig.
Continent — continere — zusammenhalten.
Continuirlich — unaufhörlich.
Corrigiren — corrigere — verbessern.
Curve — curvus — krumm.
Cyanometer — κυανος blau und μετρειν.
Declination — declinare — ablenken.
Differenzial (thermometer) — differre — unterscheid.n.
Diffusion — diffundere — auseinandergießen.
Dissonanz — dissonare — nicht Gleich- oder Eintönigkeit.
Diatherman — die Wärme durchlassend.
Diorama — διοραω — durchsehen, deutlich sehen.
Elasticität — ελαυνω, ελαω, — treiben, auseinandertreiben.
Electricität — Electrophor — ηλεκτρον Bernstein, φερειν tragen.
Ellipse — ελλειψις — das Ausbleiben — krumme Linie als der geometrische Ort eines Punktes, der sich in derselben Ebene um zwei feste Punkte bewegt, so daß die Summe seiner Entfernungen von derselben stets dieselbe bleibt.
Elongation — elongare — verlängern — Verbreiterung.
Emission — emittere — aussenden.
Endosmose — ενδον innen und ωσμος Stoß.
Flintglas — Flint — Feuerst in, durchsichtiger Quarz.
Filter — Durchschlag.
Focus — Heerd — Brennpunkt.
Harmonie — αρμονια, Klammer Gleichklang.
Homophon — ομος gleich und φωνη Ton.
Horizont — οριζω begrenze.
Hydrat, Hydrometeore — υδωρ Wasser — wasserhaltig, wässerige Lufterscheinung.
Hygrometer, υγρος naß und μετρειν.
Identisch = idem ebenderselbe &c. dem Wesen nach gleich.
Imponderabilien — imponderabile — gewichtslos.
Impuls — impulsus — Angriff.
Inclination — inclinare — Neigung.
Influenz — influere — Beeinflussung.
Isanomalen — ισος gleich und α und νομος — Gleiche Ungesetzmäßigkeit.

Interenz — inter und ferre — zwischentragen — Unterbrechung durch. Zusammenfallen.
Intensiv — intendere — angestrengt, kräftig.
Intervall — intervallum — Zwischenraum.
Isoclinen, Isodynamen und Isogonen, Linien, gleicher (magnet.) Neigung, Kraft und Ablenkung.
Latent — latere — verborgen sein.
Magnet — μαγνης — aus Magnesien stammend.
Maximum — das Größte.
Mechanik — μηχανη — Instrument, Maschine.
Medium — das Mittel.
Mikroskop — μικρος und σκοπειν — des Sehen kleinster Gegenstände.
Moleküle — Molecula — die kleine Masse.
Meteor — μετεωρος — über der Erde erhoben.
Meteorograph — selbstverzeichnender Apparat der Meteore.
Meteorologie — Lehre von den Meteoren.
Modification — Umänderung.
Multiplicator — Vervielfacher.
Monsun oder Monsson — bestimmte Winde nach einem indischen Worte.
Normal = senkrecht.
Onomatopöie — Lautnachahmung durch das Wort.
Optik — die Lehre vom Lichte — οπτω sehen.
Organ — οργανον — Werkzeug.
Oxydation — οξυς scharf, sauer; Oxyd eine Sauerstoffverbindung.
Ozon — οξω — rieche.
Parallel, παραλληλος nebeneinander gestellt.
Parabel — παραβαλλειν nebeneinanderstellen (zum Vergleichen) Gleichung dann eine krumme Linie von bestimmter Form, wie sie jeder nicht senkrecht geworfene Körper beschreibt.
Passat — passer — gehen; ein bestimmter Wind, durch den man bestimmte Gegenden erreichen kann.
Permanent — permanere — verbleiben.
Periode — περιοδος — die Wiederkehr.
Phonautograph — φονη, αυῖος γραφειν — Selbstverzeichner der Töne.
Photographie — φως Licht γραγειν schreiben — Lichtbild.
Physik, Physiologie — φυσις Natur; Naturlehre; Naturlehre der organischen Körper.
Psychologie — ψυχη Seele — Seelenlehre.
Psychrometer — ψυχρος naß — Naßkältemesser.
Pyrometer — πυρ Feuer — Maßinstrument für hohe Wärmegrade.
Pyrophor — Feuerträger — Körper die sich von selbst entzünden.
Primär — primus, erster.

Prisma, πριω füge — das Gefügte — von ebnen Flächen begrenzte Körper, so daß zwei derselben parall und congruent sind.
Pupille — pupilla — (das elternlose Mädchen) die Pupille, der Augapfel.
Reflector — reflectere — zurückbiegen, zurückwenden.
Reflection — refringere — brechen, zurückwerfen.
Regulator — regulare — ordnen, reguliren, gesetzmäßig machen, eine bestimmte Wanduhr.
Resonanz — resonare — wiedertönen.
Scala — scando davon scalae Treppe.
Silhouette — Schattenriß.
Solenoid, — σωλην — Röhre.
Sphäre, — σφαιρα — Kugel.
Spectrum, das Bild.
Statik — stare, stehen — die Lehre vom Gleichgewichte — Stillstand.
Statuirend — statuere — feststellen.
Stereoskop — στερεος steif hart, körperlich σκοπειν sehen, Instrument, um das Räumliche zu sehen.
Substrat — substernere, unterwerfen; die Grundlage (der Untersuchung).
Symmetrie — Gleichmaß.
System — Zusammenstellung.
Undulation — unda — Welle.
Vibration — vibrare — erzittern.
Volumen — volvere walzen — der Raum, den ein Körper einnimmt.

Druck von Breitkopf und Härtel in Leipzig.